익산 쌍릉 소왕릉 봉분 토층의 물리화학적 특성과 조영과정 해석

Interpretation of Construction Procedure and Physicochemical Characteristics for Soil Layers from Sowangneung (Small Royal Tomb) of Ssangneung (Twin Tombs) in Iksan, Korea

채 준¹, 박석태², 조지현³, 이찬희^{2,*}

¹(재)동방문화재연구원, ²국립공주대학교 문화재보존과학과, ³국립부여문화재연구소

Joon Chae¹, Seok Tae Park², Ji Hyun Cho³, Chan Hee Lee^{2,*}

¹Dongbang Institute of Heritage, Hongseong 32263, Korea

²Department of Cultural Heritage Conservation Sciences, Kongju National University, Gongju 32588, Korea

³Buyeo National Research Institute of Cultural Heritage, Buyeo 33123, Korea

Received November 1, 2021
Revised November 22, 2021
Accepted November 25, 2021

*Corresponding author
E-mail: chanlee@kongju.ac.kr
Phone: +82-41-850-8543

Journal of Conservation Science
2021;37(6):748-766
<https://doi.org/10.12654/JCS.2021.37.6.13>

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 익산 쌍릉은 대왕릉과 소왕릉을 포함하는 명칭으로 백제 사비기(538~660 AD)의 황혈 식석실묘이다. 소왕릉의 발굴과정에서 노출된 봉분 동측 토층은 하부로부터 기반층, 정지층, 백제시대 판축층, 도굴층 및 일제강점기 복토층으로 나눌 수 있다. 이 연구를 위해 층위를 세분하여 시료를 확보하고 재료학적 특성을 분석하였다. 토층의 입도분석 결과, 대체로 사양토의 토성을 보이며, 백제시대 판축토층에서는 양질사토가 성토되어 있고 그 위로 사양토가 판축의 주를 이룬다. 백제층의 중앙부와 최상부에는 점토 함량이 많고 일정한 입도를 가진 양토를 사용하였다. 모든 토층은 층위에 따라 약간의 차이가 있지만, 유사한 지구화학적 거동특성을 보여 토양의 모재와 성인은 거의 같은 것으로 나타났다. X-선 회절분석으로 모든 층위에서 카올리나이트를 동정하였으며, 주사전자현미경으로 카올리나이트와 할로이사이트를 확인하였다. 따라서 소왕릉 봉분의 백제시대 판축토층은 유적 일대에서 조달한 고령토가 함유된 사양토로 성토하였으며, 중상부에 점성이 강한 양토를 사용하여 불투수층을 조성하고 봉분 최상부를 밀실하게 마감한 것으로 해석된다.

중심어 익산 쌍릉, 소왕릉, 토층, 입도분포, 지구화학적 거동

ABSTRACT The Iksan Ssangneung (twin tombs), a pair of tombs comprising the Daewangneung (large royal tomb) and the Sowangneung (small royal tomb), were constructed in the typical style of stone tunnel and chamber tombs in the Baekje Kingdom during the Sabi period (538 to 660 AD) of ancient Korea. Soil layers exposed during excavation of Sowangneung in a trench east of the tomb are: the bottommost layer, the ground level layer, the Panchuk (rammed earth) layer of the Baekje, the layer created by a grave robbery, and soil recovered during the Japanese colonial period. Soil samples were obtained by segmenting an easy stratigraphic horizon into sub categorized soil layers, and their material properties were analyzed; they are composed mainly of sandy loam based on the particle size distributions. In the site foundation, loamy sand is packed in the bottommost layer, and sandy loam with high sand and silty sand fills most of the overlying layer. The central and topmost portion of the Baekje layer is composed of loam with high clay content. All soil layers show geochemical behaviors similar to those of the bottommost layer. X-ray diffraction analysis verified kaolinite in all layers, also observed in soil layers displaying high crystallinity. Kaolinite and halloysite were identified by scanning electron microscopy. Thus, we conclude that the Baekje layer of the Sowangneung is composed of sandy loam containing kaolin procured from near the site. An impermeable middle to upper layer was created using viscous loam. The top of the tomb was closed tightly.

Key Words Ssangneung in Iksan, Sowangneung, Soil layer, Particle size analysis, Geochemical behavior

1. 서 언

한반도의 횡형석실식묘는 삼국시대에 등장하여 유행했던 대표적인 양식으로 시신을 안치하는 매장 주체부 한쪽에 외부로 통하는 출입구를 만들고 상부에 봉토를 씌운 묘제이다(Lee, 2013). 국가사적으로 지정된 익산 쌍릉은 익산시 석왕동에 위치하며 대왕릉과 소왕릉을 포함하는 명칭으로 정교하게 가구식으로 축조한 백제 사비기의 전형적인 횡형석실식묘이다(Figure 1).

익산 쌍릉은 오랜 기간 백제 무왕과 선화공주의 무덤으로 여겨져 왔으며, 최근 발굴조사를 통해 출토된 인골을 분석하여 대왕릉의 피장자는 무왕으로 비정하였다(Lee *et al.*, 2018; Lee, 2019). 그러나 소왕릉은 정확한 증거는 불분명하나 무왕의 왕비로 추정되며(Kim, 2014), 특히 발굴을 통해 묘표석 및 석렬 등 여러 석재시설물이 확인되어 백제의 왕릉조성에 관한 연구에 새로운 정보를 제공하고 있다(Figure 1).

소왕릉 봉분의 직경은 약 13 m이며, 높이는 지표를 기준으로 약 2.5 m이다. 백제시대 봉분의 토층은 판축기법으로 성토되고, 석실을 중심으로 판축층이 얇고 단단하게 구성되어 있으며 점차 바깥쪽으로 갈수록 두껍고 느슨하게 구성하였다. 또한 묘도는 석실 입구를 기점으로 남쪽 구역을 굴착하여 조성하였고 묘도 중앙에 생토를 굴착하여 배수로를 설치하였다(Lee, 2019; The Research Institute for the Mahan-Baekje Culture, 2019). 대왕릉 동측 트렌치와 소왕릉 북측 트렌치의 토층은 전사하였으며, 대왕릉의 토층은 국립익산박물관에 전시되어 있다.

이 연구에서는 익산 쌍릉 소왕릉의 발굴과정에서 확인된 토층의 층위별 토양을 대상으로 재료과학적 분석을 수행하여 고고과학적 의미를 고찰하였다. 또한 봉분의 층위별 토층분석을 통해 토양의 수급과 동질성 및 제작기술을 검토하였다. 이 결과는 소왕릉의 역사적 및 고고학적 해석을 뒷받침할 수 있는 중요한 자료가 될 것이다.

2. 연구방법

이 연구를 바탕으로 소왕릉 봉분의 층위별 토양을 대상으로 산출상태와 물리적 및 화학적 특성을 분석하여, 재료의 동질성과 봉분의 축조기법을 검토하였다. 분석시료는 발굴현장에서 봉분의 토층별로 수습하였으며 밀봉하여 보관하였다. 각 토층의 정확한 색상정보를 획득하기 위해 먼셀토색칩과 색도계(JP/CH-2600, Konica Minolta, JPN)를 활용하였다.

토양은 건조 전후로 색상이 달라지기 때문에 건조 전과 후에 모두 측정을 하였으며 건조 후의 색상을 기준으로 제시하였다. 또한 각 층위별 미세자기적 특징을 규명하기 위해 전암대자율을 측정하였다. 대자율은 10^{-7} SI 단위의 측정한계를 지닌 ZH Instrument사의 SM-30을 이용하였으며, 단위는 10^{-3} SI로 표기하였다.

대부분의 시료는 점착력이 매우 낮아 5%, 10%, 15% 및 20%의 Paraloid B-72(in Acetone)를 사용해 순차적으로 진공함침하고 강화처리 및 건조한 시료를 에폭시수지로 콜드마운팅하여 시편을 제작하였다. 시편은 연마 후 실체현미경(SNZ 1000, Nikon, JPN; RH-2000, Hirox, JPN)으로 관찰하고 박편으로 제작하여 편광현미경(Eclipse LV100N POL, Nikon, JPN)을 통해 미세조직 및 구성광물을 동정하였다. 또한 대표적인 시료를 선별하여 휴대용 에너지 분산형 성분분석기(Quantax 200, Burker, DEU)가 부착된 전계 주사전자현미경(TESCAN, MIRA3)으로 광물의 미세조직을 관찰하였다.

모든 시료와 일부 특징적인 토층은 $2\ \mu\text{m}$ 이하로 분말화하여 X-선 회절분석으로 광물조성을 검출하였다. 분석기기는 Rigaku사의 MiniFlex600으로 CuK α 를 활용하였으며, 시료는 40 kV, 15 mA, $3\sim 50^\circ$ 및 $1^\circ/\text{min}$ 의 조건으로 분석하였다. 또한 모든 시료는 유도결합 플라즈마 질량 및 분광분석(ICP-MS, ICP-AES)과 중성자방사화분석(INAA)을 통해 지구화학적 정량분석을 실시하였다.

Figure 1. Photographs showing the Sowangneung in Iksan. (A, B) General and excavation views of the Sowangneung. (C) Inside view of tunnel stone chambered tomb.

한편 봉분을 구성하는 토층의 층위별 입도특성을 확인하기 위해 5% 과산화수소와 5% 염산 침적과정을 거쳐 유기물 및 탄산염 성분을 제거하고, 습식체질법과 레이저 회절법을 거쳐 입도를 분석하였다. 이때 습식체질법은 1 mm 이상을, 레이저회절법은 1 mm 이하의 입자에 대하여 수행하였으며, 레이저회절법은 Malvern Instrument(GBR)사의 Mastersizer 2000을 활용하였다.

3. 산출상태와 재료학적 특성

3.1. 토양분포

쌍릉 일대의 기반암은 고생대 변성퇴적암류이며 주로 연구지역의 북동쪽과 남서쪽에 분포한다. 이는 중생대 쥐라기의 대보화강암류에 의해 관입되었으며, 쌍릉은 이 화강암지대에 있다. 이 대보화강암류는 운모류를 포함하며, 지역에 따라 흑운모와 백운모의 함량이 상이하다. 이들은 암석학적 특징과 산출위치에 따라 복운모화강암, 흑운모화강암, 흑운모화강섬록암 및 백운모화강섬록암 등으로 세분된다(Kim *et al.*, 2011; Yang *et al.*, 2006). 또한 화강암류의 풍화에 의해 형성된 신생대 제4기의 충적층이 넓게 분포한다.

쌍릉 대왕릉 일대의 토양 특성은 송정동에 해당한다(National Institute of Agricultural Sciences, 2021). 송정동 토양은 저구릉 내지 구릉지에 발달하며, 모암이 매우 깊게 풍화된 화강암이다. 이는 전반적으로 식양토에 해당하며 표토는 주로 적갈색의 자갈이 없는 양토이며 심토는 적색의 자갈이 없는 식양토이다(Figure 2). 모재는 황적색과 암황갈색의 양토이다.

표토는 작은 입상을 보이고 부슬부슬한 기질을 가지며 점착성과 가소성이 약하다. 심토는 다소 큰 괴상의 구조를 지니고 단단하며 점착성과 가소성을 갖는 것이 특징이다. 모재에는 반문이 존재하며 단단하고 점착성과 가소성이 없다. 이 모재는 화강암에 기반하여 장식과 운모 및 석영과 같은 화강암의 석비례를 포함한다.

3.2. 토층구성

연구대상 토층단면에서 나타나는 토양은 최하단 기반층과 그 위로 백제시대 판축층, 도굴층 및 일제강점기 발굴 이후 복토층으로 구성되어 있다(Figure 3). 이 연구에서는 최하단의 기반층부터 최상부 복토층까지 각각의 성토층위에 따라 총 30개의 층위로 세분하여 토양시료를 수집하였다(Figure 3B, 3C). 모암에 가장 가까운 기반층(SSR-T30)에서는 점성이 느껴지며 암석의 풍화체가 관찰된다. 이는 쌍릉 일대의 지질학적 및 토양학적 특성이 반영된 것으로 기반토 역시 화강암질암의 풍화체로 이루어져 있으며, 그 위로 축조한 백제시대 판축층은 주로 사질토로 성토하였다.

백제시대 토층은 다른 층에 비해 비교적 세립질 또는 중립질의 석영 및 장식 입자가 두드러진다. 일부시료(SSR-T10, SSR-T13, SSR-T18, SSR-T20)에서 목탄질 유기물이 확인되며, 우백색 또는 연황색 점토질 토양이 포함된 시료(SSR-T18, SSR-T19, SSR-T20, SSR-T22, SSR-T27)도 관찰된다. 백제시대 토층에서 보이는 이러한 특징은 다른 층에서는 확인되지 않았다. 최하단 기반층(SSR-T30)의 토층에서는 화강암 기원의 암편이 관찰되며 점성도 비교적 강하다.

Figure 2. Soil maps around the Ssangneung area in Iksan. (A, B) Topsoil and subsoil.

Table 1. Chromaticity analysis of soil layers from the Sowangneung. Sample numbers are the same as in those of Figure 3B and Figure 4.

Sample number		L*	a*	b*	ΔE^*	
					Group	All samples
Recovered layer	SSR-T01	56.14	10.26	16.31	1.375	5.017
	SSR-T02	56.45	13.58	18.67	2.801	5.223
	SSR-T03	54.58	10.43	15.71	2.058	6.665
	SSR-T04	54.86	11.19	16.42	1.169	6.186
Robbery layer	SSR-T05	59.27	13.77	19.59	2.697	3.700
Recovered layer	SSR-T06	57.30	11.74	17.69	1.637	3.664
Robbery layer	SSR-T07	58.53	11.91	17.21	0.889	2.642
	SSR-T08	55.73	11.91	17.35	3.280	5.258
Baekje layer	SSR-T09	57.29	13.35	19.02	6.074	4.477
	SSR-T10	52.92	11.58	15.96	9.932	8.202
Robbery layer	SSR-T11	53.51	12.08	17.11	5.515	7.485
Baekje layer	SSR-T12	59.32	10.56	16.84	3.474	1.901
	SSR-T13	63.47	10.72	18.88	1.228	2.792
	SSR-T14	65.71	12.00	20.91	4.496	5.814
	SSR-T15	66.12	8.59	17.77	4.040	5.743
Robbery layer	SSR-T16	60.58	11.48	19.02	1.961	1.284
Baekje layer	SSR-T17	55.63	8.75	14.28	8.091	6.711
	SSR-T18	60.57	10.66	17.84	2.009	0.361
	SSR-T19	60.45	9.88	18.62	2.233	1.276
	SSR-T20	66.17	10.13	18.84	3.706	5.447
	SSR-T21	62.18	9.79	17.19	1.194	1.862
	SSR-T22	66.16	9.39	17.97	3.765	5.511
	SSR-T23	63.42	10.05	16.89	1.554	2.887
	SSR-T24	65.97	9.71	18.59	3.532	5.290
Robbery layer	SSR-T25	66.04	8.76	17.44	7.680	5.622
Baekje layer	SSR-T26	66.43	10.70	19.77	4.226	5.879
	SSR-T27	63.74	12.13	20.38	3.062	3.996
	SSR-T28	65.08	9.97	18.38	2.589	4.347
	SSR-T29	65.26	10.12	17.93	2.737	4.472
Bottom layer	SSR-T30	66.67	10.91	19.11	-	5.938

Figure 3. Excavation site and soil profiles of the Sowangneung. (A) Excavation trench showing the east side of the tomb. (B) Detail soil layers of the trench. (C) Simplified soil layers by ages. Numbers are the same as in those of Table 1.

3.3. 물리적 특성

3.3.1. 색도분석

연구대상 토층 단면에서 수습한 총 30점의 시료에 대한 색상을 보면, 전반적으로 건조 전에는 황적색 또는 진갈색 계통으로 적색도가 강하다. 건조 후에는 백제시대 토층을 중심으로 일제강점기 복토층에 비해 더욱 담황색을 보인다. 색도의 정량 분석 결과, 명도(L^*)는 일제강점기 복토층 54.58~57.30(평균 55.87), 도굴층 53.51~66.04(평균 58.94), 백제시대 판축층 52.92~66.43(평균 62.55)으로 측정되었다(Table 1). 층위별로 비교할 때, 백제시대 조성층이 다른 층위에 비해 넓은 명도 분포를 나타냈으며, 다소 높은 명도를 보였다(Figure 4).

적색도(a^*)는 복토층 10.26~13.58(평균 11.44), 도굴층 8.76~13.77(평균 11.65), 백제 판축층 8.59~13.35(평균 10.45)로 각 층위의 분포범위는 유사하며, 도굴층이 가장 적색을 띠었다. 또한 황색도(b^*)는 복토층 15.71~18.67(평균 16.96), 도굴층 17.11~19.59(평균 17.95), 백제 판축층 14.28~20.91(평균 18.11)로 백제층에서 가장 넓은 범위를 보였고, 가장 황색을 띠는 것을 알 수 있다(Figure 4).

최하단 기반층(SSR-T30) 토양의 색도와 비교한 결과, 기반층의 명도는 66.67로 모든 층위의 명도보다 높았다. 적색도는 10.91로 일제강점기 복토층 및 도굴층보다 낮았으며, 백제층보다 높았다. 또한 황색도는 19.11로 일제강점기 복토층, 도굴층 및 백제층보다 높게 나타난다. 전반

적으로 일제강점기의 복토층과 도굴층은 적색도가 강한 황적색을 띠며, 백제층은 다소 밝은 담황색계열을 보였으나, 최하단 기반층은 적색이 강한 황색을 띤다.

전체 토층의 색도로 볼 때 백제층은 명도, 적색도 및 황색도의 범위가 일제강점기 복토층의 층위와 도굴층의 색도보다 넓다(Figure 4). 이는 백제층 토양이 다른 층위의 토양보다 정선되었고, 의도적으로 성질이 다른 흙을 사용했다는 것을 유추할 수 있다. 각 토층의 층위별 색도차를 정량적으로 파악하기 위해 전체 토양의 평균값으로 색차를 산출하면 Table 1 및 Figure 4와 같다.

이 결과, 모든 층위의 토양은 넓은 색도범위를 나타내며, 시기별 토층에 따라 구분되는 영역으로 도시된다. 각 그룹별 색차분포 또한 구분되는 양상을 보여 토양의 특성이 조금씩 다른 것으로 해석된다. 그러나 층위별 그룹 간의 차이와 동일성을 명확히 구분하기 위해서는 이들에 대한 광물학적 및 지구화학적 특성분석을 통해 검증할 필요가 있다.

3.3.2. 미세자기적 특징

소왕릉 토층의 미세자기적 특성을 파악하기 위해 전암 대자율을 측정하였다(Table 2). 전암대자율은 지각구성물질의 지질학적 형성과정을 반영하는 대표적인 물리적 성질로 문화재 분야에서는 재료의 동질성과 산지추정 및 보수재료의 조달뿐만 아니라, 토층의 고고과학적 해석에도 적용되어 왔다(Kim *et al.*, 2010; 2011; 2013; Lee *et al.*, 2007; Lee and Jin, 2016).

Figure 4. Diagrams showing the color changes and magnetic susceptibility of soil layers from the Sowangneung. Numbers are the same as in those of Figure 3B and Table 1.

Table 2. Summary on the magnetic susceptibilities of soil layers from the Sowangneung

Soil layers	Min	Max	Mean
Recovered layers	0.380	1.422	0.940
Robbery layers	0.367	2.345	1.078
Baekje layers	0.008	5.980	1.351
Bottom layers	0.177	2.420	0.844
Average	0.309	2.522	1.234

전암대자율 측정 결과, 모든 토층은 $0.008 \sim 5.980$ (평균 1.234×10^{-3} SI unit)의 분포를 보였다(Table 2, Figure 4). 최하단 기반층 토양은 모암의 특성이 가장 잘 나타나는 시료이며, 기반층의 대자율을 기준으로 여러 층준별 차이를 파악할 수 있다. 일제강점기 복토층은 최하단 기반의

토양과 대자율 분포범위 및 평균값이 대체로 유사하여, 토양의 성인적 환경 및 재료학적 특성이 매우 유사한 것으로 판단된다.

백제시대 판축토층에서 가장 넓은 대자율 분포를 보이며 모든 그룹별 층위가 이 범위 안에 포함되어 있어, 이는 다양한 성질의 광물이 함께 섞여 성토된 것으로 판단할 수 있다(Table 2, Figure 4). 그러나 대자율 값은 재료의 혼입에 따라 달라질 수 있어, 토양의 재료학적 동질성을 검토하기 위해서는 다른 분석과 비교가 필요하다.

3.4. 입도분포 및 분급

일반적으로 토양은 점토, 실트, 모래 및 자갈 등으로 구성된다(Figure 5). 모래는 토양의 골격을 형성하며 공극을 통해 통기 또는 배수를 조절하나 점착성과 응집성은

Figure 5. Ternary diagrams of soil texture showing the relative contents of sand, silt and clay for soil layers from the Sowangneung.

약하다. 미사는 점착성은 없으나 응집력은 있다. 점토는 표면흡착 및 이온교환 등 물리화학적 반응을 하며 점착성 및 응집성이 매우 크다. 따라서 토양의 상대적 구성비는 토성차이와 형성과정 해석에도 도움이 된다.

소왕릉 봉분 축조의 인위적 개입양상을 파악하기 위해 위치 및 층위별 토양의 입도와 토성을 살펴보고 이를 종합하여 재료학적 특성을 검토하였다. 각 토층의 토성분류 결과, 대부분 사양토(sandy loam), 양토(loam) 및 양질사토(loamy sand)의 영역 내에 도식되었다(Figure 5). 따라서 점토 함량이 15% 이하의 모래와 미사 함량이 80% 이상으로 다소 거친 촉감을 갖는 토성으로 구성된 것을 확인하였다(Table 3, Figure 5).

각 토층의 구체적인 입도 및 토성을 파악하기 위해 모든 구성요소의 함량을 비교하였다. 모든 시료에서 자갈, 모래, 미사 및 점토의 함량이 조금씩 달라 재료의 선별과정이 있었을 것으로 추정된다. 자갈은 토층의 위치에 상관없이 전반적으로 다소 상이한 함량을 보이며, 전체의 평균 함량은 11.88%이다. 백제시대의 판축토층은 평균 12.73%로 기반층 및 다른 층위에 비해 비교적 높은 자갈의 함량을 보였다(Table 3).

모래는 토층의 모든 층위에서 40% 이상 높은 함량을 보였으며 평균 함량은 52.33%이다. 백제시대 판축층은 평균 55.75%로 모든 층위 중에서 가장 높은 모래 함량을 보였다(Table 3). 이는 백제시대 토층의 성토에 인위적으로 모래를 배합하며 입도분포를 조절한 것으로 판단할 수 있

는 근거가 된다(Figure 5, Figure 6).

미사는 모든 층위에서 20~40%의 함량 범위를 보이며 평균 27.90%가 함유되어 있다. 최하단 기반층의 미사는 25.86%이며, 백제시대 판축토층은 평균 24.94%로 모든 층위에서 가장 낮다. 점토는 전체 입자 중에서 가장 낮은 비율을 차지하며, 모든 층위에서 평균 7.89%의 함량을 보였다. 최하단 기반층의 점토는 11.17%이며, 일제강점기 복토층은 평균 11.60%로 유사한 범위이다.

Figure 7. Diagram showing the mean particle size versus sorting degree for soil layers from the Sowangneung.

Figure 6. Diagrams showing the cumulative frequency distribution curves for soil layers from the Sowangneung.

Table 3. Results of particle size analysis and sorting degree for soil layers from the Sowangneung. Numbers are the same as in those of Figure 3B and Figure 4.

Sample number		Particle size distribution							USDA standard
		Gravel (%)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Mean (Φ)	Median (Φ)	SD (Φ)	
Recovered layer	SSR-T01	9.56	41.72	38.51	10.21	3.34	3.89	3.42	Loam
	SSR-T02	8.10	42.14	37.80	11.96	3.52	3.97	3.47	Loam
	SSR-T03	10.92	43.44	35.28	10.36	3.19	3.61	3.42	Loam
	SSR-T04	9.62	40.67	35.30	14.41	3.63	3.95	3.72	Loam
	SSR-T06	11.48	40.15	37.33	11.05	3.36	3.89	3.52	Loam
	Average	9.94	41.62	36.84	11.60	3.41	3.86	3.51	-
Robbery layer	SSR-T05	14.65	44.15	32.31	8.89	2.91	3.28	3.45	Sandy loam
	SSR-T07	11.55	44.13	34.61	9.71	3.13	3.54	3.39	Loam
	SSR-T08	10.26	42.46	37.07	10.22	3.28	3.80	3.39	Loam
	SSR-T11	7.41	50.47	33.08	9.04	3.16	3.37	3.25	Sandy loam
	SSR-T16	11.00	62.31	21.16	5.52	2.16	1.88	2.96	Sandy loam
	SSR-T25	13.03	61.52	19.66	5.80	2.13	2.06	2.97	Sandy loam
Baekje layer	Average	11.32	50.84	29.65	8.20	2.80	2.99	3.24	-
	SSR-T09	12.66	43.91	34.64	8.79	3.03	3.50	3.38	Loam
	SSR-T10	9.51	39.40	39.52	11.58	3.49	4.08	3.49	Loam
	SSR-T12	8.69	50.37	32.30	8.63	3.03	3.28	3.25	Sandy loam
	SSR-T13	10.03	48.41	33.28	8.27	2.98	3.47	3.25	Sandy loam
	SSR-T14	12.58	56.64	24.47	6.32	2.41	2.53	3.11	Sandy loam
	SSR-T15	13.49	58.50	22.41	5.60	2.29	2.39	3.02	Sandy loam
	SSR-T17	14.48	56.50	23.56	5.46	2.19	2.13	3.03	Sandy loam
	SSR-T18	13.62	57.72	23.25	5.41	2.16	2.01	3.02	Sandy loam
	SSR-T19	14.66	61.51	18.95	4.88	1.91	1.73	2.89	Sandy loam
	SSR-T20	9.75	64.40	20.06	5.79	2.22	2.17	2.90	Sandy loam
	SSR-T21	10.25	57.25	25.27	7.23	2.51	2.51	3.14	Sandy loam
	SSR-T22	15.37	56.96	22.67	5.00	2.16	2.27	2.98	Sandy loam
	SSR-T23	17.28	41.13	31.82	9.77	2.89	3.31	3.54	Loam
	SSR-T24	13.04	59.51	21.05	6.40	2.18	1.88	3.13	Sandy loam
	SSR-T26	15.39	65.06	15.13	4.42	1.47	0.89	2.72	Loamy sand
	SSR-T27	9.23	55.19	28.33	7.25	2.79	3.08	3.14	Sandy loam
	SSR-T28	14.53	65.42	16.46	3.59	1.67	1.45	2.70	Loamy sand
	SSR-T29	14.56	65.54	15.81	4.08	1.68	1.45	2.70	Loamy sand
	Average	12.73	55.75	24.94	6.58	2.39	2.45	3.08	-
Bottom layer	SSR-T30	9.70	53.27	25.86	11.17	2.99	3.01	3.44	Sandy loam
Average of all samples		11.88	52.33	27.90	7.89	2.66	2.81	3.19	-

백제시대 판축층의 점토 함량은 평균 6.58%로 모든 층위에서 가장 낮다(Table 3). 이는 양토부터 양질사토까지 다양하게 분포하고 있으며, 각 층위별로 불량한 입도분포를 보여 다소 차이가 있다. 이들의 입경과 누적분포곡선 및 균등계수로 볼 때(Blair and Mcpherson, 1999; Folk and Ward, 1957; Folk *et al.*, 1970), 백제시대 판축층의 구성은 봉분을 성토할 당시 재료의 정선 또는 토성이 다른 흙을 섞는 등 인위적인 개입이 있었던 것으로 해석된다. 이는 복토층과 가까운 도굴층에서도 확인되는 특징이다(Figure 6).

이를 Folk and Ward(1957)의 분류에 따라 평균입도, 중앙값 및 분급도(표준편차, SD)를 산출하여 각 층위의 토양특성을 검토하였다. 전체 토층의 평균입도와 분급도는 2.66Φ 및 3.19Φ 이며, 최하단 기반층은 2.99Φ 와 3.44Φ 로 나타났다. 백제시대 판축층은 평균 2.39Φ 의 입도와 3.08Φ 의 분급도를 보였다. 일제강점기 복토층과 도굴층은 전체 평균보다 높은 분급도를 가지며, 복토층은 기반층보다 높다(Table 3, Figure 7). 특히 백제시대 판축층은 세립사부터 중립사까지 다양한 입도를 가지며 전체 토층의 평균보다 낮은 가장 양호한 분급을 보였다.

분급도가 높다는 것은 균등한 입도분포를 갖지 않음을 의미하며, 일제강점기 복토층은 계단식 입도분포를 보였다(Figure 6). 이는 토층구성에 낮은 기술의 정선 또는 별다른 정선과정을 거치지 않고 성토를 했을 것으로 판단할 수 있는 근거가 된다. 그러나 백제시대의 판축층은 상당히 인위적인 정선과정을 경험한 것으로 해석된다.

3.5. 광물 및 조직적 특성

3.5.1. 광물 및 조직적 특징

X-선 회절분석으로 소양릉 토층의 광물학적 조성을 보다 정량적으로 검토하였다. 이 결과, 층준에 관계없이 석영이 가장 우점광물로 확인되며, 알칼리 장석과 녹니석, 운모 및 일라이트 등 화강암류를 구성하는 수반 및 변질 광물이 검출된다. 또한 모든 층위에서 광물조성 및 함량에 큰 차이가 없는 것으로 보아, 거의 동일한 모암 및 토양생성 조건에서 형성되었을 가능성이 매우 높다.

특히 모든 토층에서 저각도의 카올리나이트(kaolinite)가 다소 높은 결정도를 보였다. 최하단 기반층도 카올리나이트가 다소 높은 결정도를 보인다(Figure 8). 이는 쌍릉 일대에 분포하는 기반암의 특성을 반영하는 것이며, 상당한 풍화를 겪은 것으로 판단된다. 카올리나이트는 백제시대 판축토층에서도 두드러져, 봉분의 축조과정을 해석하는 데 다각적인 검토가 필요함을 지시한다.

모든 토층의 광물조성과 조직적 특징을 살펴보기 위해

실체 및 편광현미경으로 관찰하였다. 이 결과, 소양릉 토층은 전반적으로 화강암질 모재가 풍화되어 황갈색을 보이며, 부분적으로 적갈색을 띠는 부분이 나타난다. 또한 모든 토층은 화강암류의 풍화산물로 구성되어 있어, 층위에 상관없이 유사한 조직을 보인다(Figure 9).

각 토층에서 확인되는 광물들은 모두 화강암류의 풍화산물이며, 다각형, 아각형 및 아원형 등 매우 다양한 형태로 산출된다. 또한 풍화가 진행된 은미정질 기질과 함께 주로 세립에서 중립질의 규장질 광물이 나타난다. 규장질 광물은 대부분 석영이며, 견운모화된 미사장석, 알칼리 장석 및 사장석이 관찰된다. 또한 기질에서는 판상조직의 운모류가 특징적이다(Figure 9G, 9I, 9J).

표층을 이루는 일제강점기 복토층은 유기물과 점토질 적물이 두드러지고 광물을 구분하기 힘들 정도로 풍화가 많이 진행되어 은미정질 기질을 이루며, 일부 중조립질의 석립을 볼 수 있다(Figure 9A, 9B). 도굴층 토양은 분급이 불량하고 풍화가 심하여 은미정질 기질을 이루며, 중세립질의 석영과 장석이 관찰된다. 또한 불투명 광물과 판상조직을 갖는 운모류를 포함한다. 기질을 이루는 광물들은 풍화로 인해 현미경으로 동정하기는 어렵다(Figure 9C, 9D).

백제시대 판축층에서는 미세립질의 비현정질 기질과 함께 2~3 mm 내외의 석영과 장석 입자가 나타난다. 특징적으로 일부 시료(SSR-T10, SSR-T23)에서는 점질의 우백색 토양이 관찰된다(Figure 9E~9J). 최하단 기반층에서는 적색의 철산화물이 넓게 나타나며 석영과 장석 및 흑운모로 구성된 화강암 모재의 조립질 석립이 관찰된다(Figure 9K~9L).

이 판축층은 대체로 은미정질 기질을 가지며, 중조립질의 광물입자를 볼 수 있다. 철산화물로 인해 적색을 보이기도 하며, 견운모화된 미사장석과 운모류가 풍화되어 생긴 녹니석이 있다. 양토에 속하는 토층(SSR-T10)은 일부 조립질 광물들이 군집을 이루고 있으며 대체로 풍화가 심하여 밀실한 기질을 갖는다. 반면 양질사토(SSR-T26)에서는 조립질의 석영과 장석 등 기질을 이루는 입자들은 비교적 크게 나타난다(Figure 9E, 9I).

3.5.2. 미세조직적 특징

모든 토층에서 카올린족 점토광물을 확인하기 위해 주사전자현미경(SEM)으로 관찰하였으며, X-선 회절분석으로 카올리나이트의 결정도가 높았던 시료와 우백색 토층에서 선별하였다. 이 결과, 선별한 모든 시료에서는 판상과 침주상조직을 이루는 점토광물이 다량 관찰되었고, 이들은 고령석군에 속하는 카올리나이트와 할로이사이트 그룹의 광물로 동정하였다(Figure 10).

Figure 8. X-ray diffraction patterns of soil layers from the Sowangneung. Ch: chlorite, M/I: mixed layer of mica and illite, Ka: kaolinite, Q: quartz, Af: alkali feldspar. Numbers are the same as in those of Figure 3B and Figure 4.

Figure 9. Representative photographs showing the stereoscopic and polarizing microscopic images of soil layers from the Sowangneung. (A, C, E, G, I, K) Stereoscopic images of soil layers. (B, D, F, H, J, L) Polarizing microscopic images of soil layers. Numbers are the same as in those of Figure 3B and Figure 4.

판상조직을 이루는 카올리나이트는 단일 또는 군집체로 관찰되거나 벽개사이가 벌어지면서 그 사이로 판상광물이 성장한 모습으로 나타난다. 전형적인 카올리나이트

외에도 판상조직의 광물집합체가 다수 관찰되는 것으로 보아 동정이 어려운 다른 점토광물들도 있는 것으로 판단된다(Figure 10B). 또한 우백색 점질 토양에서는 카올리나

Table 4. Analytical results of energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS) for the whiteness clay of SSR-T23 sample from the Sowangneung.

Sample numbers	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	K ₂ O	C
SSR-T23_01 (wt%)	46.35	41.80	-	-	-	4.66	7.20
SSR-T23_02 (wt%)	47.28	43.04	-	-	-	1.50	8.18
SSR-T23_03 (wt%)	57.13	34.05	-	-	-	4.96	3.86
SSR-T23_04 (wt%)	54.03	35.34	-	-	-	6.62	4.01

Figure 10. Representative scanning electron microscope images of soil layers from the Sowangneung. (A, B) SEM images of kaolinite. (C) SEM images of kaolinite and halloysite. Numbers are the same as in those of Figure 3B and Figure 4.

이트의 판상결정과 할로사이트로 보이는 침주상결정이 모두 관찰되었다(Figure 10C).

이 카울린족 점토광물의 구성원소를 파악하고자 에너지분산분석(energy dispersive X-ray spectroscopy, EDS)을 실시하였다. 이 결과, 분석 시료의 단면에서 SiO_2 와 Al_2O_3 함량이 모두 40 wt%를 넘는 높은 비율을 차지하며 K_2O 는 비교적 낮은 함량을 보였다. 그러나 다른 원소는 검출되지 않는 것으로 보아 카올리나이트로 동정하였다(Table 4).

3.6. 지구화학적 특성

소왕릉 토층의 지구화학적 특성을 파악하고 각 토양의 재료학적 동질성 여부를 판별하기 위해 주성분, 미량, 희토류, 호정 및 불호정 원소 함량을 분석하고 특정 기준치로 표준화하여 원소의 거동양상을 검토하였다. 주성분과 미량 원소 함량은 알칼리 화강암의 평균조성(Govindaraju, 1989; Nockolds, 1954)으로, 희토류 원소는 콘드라이트 운석의 조성(Taylor and McLennan, 1985)로, 호정 및 불호정 원소는 원시맨틀 조성(Pearce, 1983)을 적용하여 표준화하였다.

토층의 주성분 원소 함량은 모두 SiO_2 가 가장 높은 것으로 확인되며 다음으로 Al_2O_3 가 높게 검출되었다. 전체적으로 SiO_2 와 Al_2O_3 및 Fe_2O_3 의 평균함량은 각각 55.24 wt%, 23.99 wt% 및 5.69 wt%로 나타났다(Table 5). 주성분 원소의 거동특성은 토층의 위치에 상관없이 모든 시료에서 Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO 및 TiO_2 등은 부화되었으며 CaO , Na_2O , K_2O 와 P_2O_5 는 결핍하는 양상이다(Figure 11).

미량원소의 거동특성은 토층에 관계없이 Ce와 Pb에서 평균조성과 유사하게 나타났다. 모든 토층에서 Ba, Be, Cu, Sr 및 Yb 등이 결핍하며, 특히 Cu와 Sr 및 Yb에서 크게 부족한 양상이다. 또한 모든 시료는 Cd, Co, Sc, V 및

Zn에서 부화경향을 나타낸다. Yb은 일제강점기 복토층에서 결핍되는 거동 정도가 약한 편이며, 봉분의 하부층으로 내려갈수록 더욱 결핍되는 양상을 나타냈다(Table 6, Table 7, Figure 11).

각 토층의 동질성에 대한 명확한 검토를 위해 희토류 원소의 함량을 분석하였다(Table 7). 이들의 거동특성은 Figure 11과 같으며, 주성분 원소와 마찬가지로 대부분의 토양에서 유사한 거동양상을 보였다. 모든 희토류원소는 기준치보다 크게 부화하며 경희토류에서 중희토류로 갈수록 부화 정도가 점차 감소하는 경향을 보인다. 또한 모두 음의 기울기를 보이고 Yb와 Lu에서 다소 분산된 경향성이 있다. 특히 백제층에서 가장 넓은 분포를 보이며, 봉분의 표층에서 기반암으로 갈수록 중희토류 원소에서 더 결핍된 양상을 나타낸다(Figure 11).

연구대상 토층의 지구화학적 동질성을 보다 다각적으로 해석하기 위해 분석한 모든 시료의 전체 원소에서 상대적 호정성과 불호정성을 갖는 원소를 선별하고, 이들을 원시의 맨틀조성(Pearce, 1983)으로 표준화하였다(Figure 11). 이 결과, 토층의 위치에 관계없이 대부분의 토양에서 매우 유사한 거동양상이 확인되며, Th을 기준으로 대칭된 기울기를 보인다. 이러한 대칭적 기울기는 분화과정이 충분히 진행된 환경에서 나타나며, P_2O_5 등의 원소에서 나타나는 결핍은 마그마의 정치환경에서 확인되는 특징에 해당한다.

이를 바탕으로 소왕릉 토층의 지구화학적 거동양상을 검토하면 거의 모든 토층에서 일치하나 일부 원소에서 부화와 결핍 정도가 약간의 차이를 보인다. 그러나 모든 층위에서 대체로 지구화학적 거동특성이 매우 일치하는 것으로 보아 동일한 모암을 기원으로 하는 풍화토를 활용한 것으로 판단된다. 특히 백제시대 판축층에서 입도와 점토 광물의 함량 및 조성변화 등 상대적으로 다양한 특징으로

Figure 11. Normalized geochemical variations of major, minor, rare earth, compatible and incompatible elements for soil layers from the Sowangneung.

Table 5. Concentrations (wt%) of major elements for soil layers from the Sowangneung. Numbers are the same as in those of Figure 3B and Figure 4.

No.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	LOI	Total
SSR-T01	58.72	19.78	4.68	0.05	0.71	0.12	0.27	3.03	0.66	0.07	10.47	98.56
SSR-T02	60.00	20.24	5.66	0.04	0.69	0.05	0.16	2.94	0.79	0.05	9.14	99.76
SSR-T03	54.70	23.62	5.86	0.05	0.78	0.05	0.15	3.00	0.80	0.04	10.48	99.53
SSR-T04	57.55	22.60	5.53	0.05	0.78	0.04	0.16	3.11	0.83	0.05	9.36	100.06
SSR-T05	55.98	23.34	5.63	0.04	0.85	0.04	0.16	3.44	0.79	0.04	9.95	100.26
SSR-T06	58.89	20.99	5.78	0.04	0.78	0.05	0.19	3.37	0.84	0.03	8.87	99.83
SSR-T07	57.56	22.09	5.34	0.04	0.80	0.05	0.20	3.49	0.80	0.05	9.22	99.64
SSR-T08	57.81	22.20	5.63	0.04	0.77	0.05	0.21	3.50	0.84	0.04	9.08	100.17
SSR-T09	53.58	25.02	6.28	0.04	0.93	0.03	0.14	3.03	0.82	0.04	10.45	100.36
SSR-T10	55.80	22.83	5.41	0.04	0.83	0.03	0.15	2.94	0.81	0.04	9.83	98.71
SSR-T11	55.94	24.15	5.36	0.04	0.82	0.05	0.20	3.39	0.80	0.03	10.47	101.25
SSR-T12	55.98	24.24	5.70	0.05	0.93	0.03	0.14	3.02	0.86	0.04	9.14	100.13
SSR-T13	53.12	25.52	5.87	0.05	0.99	0.02	0.13	3.28	0.80	0.03	10.48	100.29
SSR-T14	54.01	24.55	5.87	0.05	1.01	0.02	0.14	3.43	0.81	0.04	9.36	99.29
SSR-T15	53.86	24.43	5.88	0.06	1.07	0.02	0.14	3.39	0.83	0.03	9.95	99.66
SSR-T16	53.21	26.09	5.83	0.05	0.97	0.02	0.13	3.34	0.81	0.04	8.87	99.36
SSR-T17	54.10	24.29	5.97	0.05	1.05	0.02	0.15	3.45	0.85	0.03	9.22	99.18
SSR-T18	53.76	23.96	5.65	0.05	1.00	0.02	0.15	3.65	0.81	0.03	9.08	98.16
SSR-T19	53.29	25.74	5.76	0.06	1.09	0.02	0.14	3.69	0.88	0.03	10.45	101.15
SSR-T20	53.78	25.15	6.01	0.05	1.02	0.02	0.14	3.51	0.85	0.06	9.83	100.42
SSR-T21	53.30	25.62	5.91	0.05	0.94	0.02	0.15	3.64	0.82	0.03	9.83	100.31
SSR-T22	53.95	25.20	5.88	0.06	1.07	0.02	0.14	3.53	0.89	0.03	9.52	100.29
SSR-T23	54.34	24.42	5.91	0.05	0.99	0.02	0.15	3.47	0.86	0.03	9.57	99.81
SSR-T24	54.28	24.75	5.73	0.05	0.96	0.02	0.15	3.68	0.85	0.04	9.39	99.90
SSR-T25	54.11	25.54	5.61	0.06	1.07	0.02	0.14	3.65	0.82	0.03	9.70	100.75
SSR-T26	54.15	25.51	5.59	0.05	1.00	0.02	0.16	3.88	0.83	0.03	9.57	100.79
SSR-T27	54.85	24.85	5.63	0.05	0.97	0.02	0.16	3.72	0.82	0.04	9.62	100.73
SSR-T28	55.76	24.05	5.61	0.06	1.03	0.02	0.15	3.70	0.84	0.03	9.18	100.43
SSR-T29	54.85	24.74	5.72	0.05	0.97	0.02	0.14	3.51	0.84	0.04	9.67	100.55
SSR-T30	55.94	24.15	5.50	0.05	0.86	0.02	0.17	3.86	0.85	0.04	9.09	100.53

보여, 토층을 구성할 때 인위적인 선택적 혼합이 있었던 것으로 해석할 수 있다.

4. 고고과학적 고찰

4.1. 토층의 특성과 구성

소왕릉 토층의 색도 및 색차분석 결과, 각 층위별로 다

양한 분포가 확인되나 기반층과 복토층에 비해 백제층과 도굴층의 색차가 다소 차이를 보였다. 이는 백제층이 인위적인 정선을 통해 일정하게 성토한 층이며, 도굴층은 도굴에 의해 여러 토층들이 교란되어 섞여 있기 때문인 것으로 판단하였다. 또한 토층의 토색과 조성 및 대자율은 백제 판축층에서 가장 넓은 분포를 보임에 따라 백제층은 여러 곳의 성질이 조금 다른 흙을 섞어 성토한 것으

Table 6. Concentrations (ppm) of some minor elements for soil layers from the Sowangneung. Numbers are the same as in those of Figure 3B and Figure 4.

No.	Ba	Be	Co	Cr	Cu	Hf	Ni	Pb	Rb	Sr	Th	V	Zn
SSR-T01	460	4	10	45	18	6.1	18	40	220	73	29.1	69	95
SSR-T02	522	3	12	44	17	7.9	21	36	250	78	27.9	87	93
SSR-T03	504	4	13	41	14	10.4	17	33	280	81	34.2	83	109
SSR-T04	523	3	13	55	20	8.6	20	38	200	77	31.5	86	107
SSR-T05	546	4	11	41	15	7.6	17	39	210	91	34.7	85	116
SSR-T06	569	3	14	58	15	8.7	18	36	260	97	35.0	88	101
SSR-T07	577	3	10	40	13	9.3	16	37	250	100	31.4	82	105
SSR-T08	580	3	13	46	12	9.9	18	39	250	101	32.9	85	99
SSR-T09	483	4	13	47	16	6.8	17	38	270	79	35.7	91	123
SSR-T10	492	3	14	49	17	7.5	21	36	220	75	34.1	85	113
SSR-T11	543	3	13	38	13	8.1	18	33	300	94	34.9	80	110
SSR-T12	512	4	13	41	14	8.0	17	30	210	77	34.1	85	116
SSR-T13	541	4	13	41	15	7.2	11	33	270	87	42.8	80	129
SSR-T14	578	4	13	33	11	9.1	11	32	290	96	37.7	78	125
SSR-T15	561	4	11	25	11	7.3	9	31	260	94	38.4	75	137
SSR-T16	522	4	13	28	14	8.1	13	33	270	83	41.1	80	132
SSR-T17	608	4	12	25	11	7.3	11	30	280	100	37.9	77	132
SSR-T18	613	4	12	24	12	7.2	11	33	260	96	36.6	77	130
SSR-T19	588	4	12	28	10	7.0	9	33	240	97	41.6	77	136
SSR-T20	582	4	12	18	10	7.9	9	32	290	93	43.5	78	127
SSR-T21	603	4	10	29	11	6.7	12	33	220	96	40.2	77	120
SSR-T22	598	4	12	35	10	8.4	8	34	260	97	41.1	75	133
SSR-T23	611	4	9	25	11	9.0	12	33	280	100	52.3	82	124
SSR-T24	624	4	11	15	11	9.7	11	34	300	103	41.4	79	126
SSR-T25	571	4	12	23	11	8.6	10	34	320	93	39.2	76	137
SSR-T26	636	4	11	23	10	9.5	10	34	310	104	40.5	75	123
SSR-T27	638	4	11	18	10	9.6	11	33	310	106	40.6	78	120
SSR-T28	626	4	10	12	9	8.5	7	33	290	105	41.5	74	122
SSR-T29	592	4	11	17	10	9.8	10	35	270	97	38.0	75	122
SSR-T30	641	3	11	22	9	7.6	10	37	230	108	38.0	77	115

로 해석할 수 있다(Figure 4).

소왕릉 토층의 토성분포 검토 결과, 각각의 층준에 따른 특별한 토성은 확인되지 않으며 전체적으로 양토와 사양토 및 양질사토가 나타난다. 그러나 최하단 기반층은 사양토로, 일제강점기 복토층은 양토로, 백제시대 판축층과 도굴층은 양토와 사양토 및 양질사토가 혼재하는 양상을 보였다. 최하단 기반층은 다소 점성이 강하고 화강암

을 모재로 하는 암편들이 관찰된다. 일제강점기 발굴 후 복토할 때 기반층을 이루고 있는 흙을 재사용한 것으로 판단되며, 도굴층은 토층의 교란이 매우 심하여 일관된 특징을 나타내지 않는다(Figure 12).

백제시대 판축층의 하부는 자갈을 포함한 다소 거친 양질사토로 성토하고 그 상부는 주로 사양토를 사용하였다. 또한 점성이 비교적 강한 양토를 백제층의 최상부와

Table 7. Concentrations (ppm) of some rare earth and minor elements for soil layers from the Sowangneung. Numbers are the same as in those of Figure 3B and Figure 4.

No.	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Tb	Yb	Lu	Cs	Sc	Ta	Zr
SSR-T01	51.5	97	23	5.4	1.3	<0.5	2.2	0.34	8.7	9.1	<1	198
SSR-T02	43.4	102	29	4.8	1.2	<0.5	1.9	0.27	7.7	10.3	2	290
SSR-T03	51.2	110	32	5.2	1.7	<0.5	1.6	0.32	8.1	10.1	<1	377
SSR-T04	47.8	116	30	5.2	1.2	<0.5	2.0	0.38	6.2	10.7	<1	282
SSR-T05	59.2	114	30	6.3	1.4	<0.5	1.5	0.26	10.0	9.8	<1	284
SSR-T06	51.2	112	29	5.3	1.5	<0.5	1.8	0.28	9.2	9.5	<1	313
SSR-T07	50.0	99	39	5.4	1.3	<0.5	1.8	0.29	8.6	9.1	<1	296
SSR-T08	50.2	106	30	5.1	1.4	0.5	1.9	0.31	7.7	9.5	<1	348
SSR-T09	50.8	120	33	5.5	1.4	<0.5	1.6	0.26	7.5	10.6	<1	257
SSR-T10	54.3	110	42	6.0	1.4	<0.5	1.6	0.26	8.7	11.2	2	249
SSR-T11	49.7	115	33	5.5	1.5	<0.5	1.5	0.32	7.1	9.9	<1	270
SSR-T12	47.3	106	33	5.3	1.5	<0.5	1.7	0.38	6.3	10.5	<1	282
SSR-T13	50.8	115	38	5.4	1.3	<0.5	1.2	0.23	7.7	9.4	<1	257
SSR-T14	48.2	102	39	5.1	1.3	<0.5	1.1	0.19	7.9	8.9	<1	264
SSR-T15	47.6	109	28	5.0	1.2	<0.5	0.9	0.21	5.3	8.8	2	274
SSR-T16	56.0	116	43	6.2	1.6	<0.5	1.4	0.38	8.9	9.5	<1	260
SSR-T17	45.7	112	30	5.0	1.3	<0.5	1.2	0.21	6.4	9.0	<1	256
SSR-T18	47.5	111	31	5.0	1.5	<0.5	1.4	0.26	8.5	9.0	<1	237
SSR-T19	47.2	121	32	4.9	1.3	<0.5	1.1	0.17	5.6	8.6	<1	230
SSR-T20	47.2	120	30	5.1	1.2	<0.5	1.2	0.21	7.5	9.1	<1	269
SSR-T21	46.8	111	35	5.2	1.3	<0.5	0.7	0.26	7.3	9.2	<1	252
SSR-T22	45.3	111	35	5.0	1.3	<0.5	1.3	0.30	6.1	8.5	<1	276
SSR-T23	54.1	111	37	6.4	1.4	<0.5	1.1	0.23	7.9	9.7	<1	264
SSR-T24	55.7	122	40	6.6	1.4	<0.5	1.0	0.20	7.0	8.9	<1	256
SSR-T25	53.0	115	45	6.0	1.1	<0.5	1.3	0.22	7.4	8.4	<1	250
SSR-T26	57.8	117	33	6.9	1.4	<0.5	1.3	0.28	10.4	9.4	<1	260
SSR-T27	57.6	108	35	6.8	1.4	<0.5	1.1	0.26	8.5	8.4	<1	248
SSR-T28	54.3	112	45	6.5	1.3	0.9	1.1	0.24	8.1	8.0	<1	252
SSR-T29	46.6	117	41	5.6	1.3	<0.5	1.1	0.21	7.2	8.4	<1	271
SSR-T30	36.8	107	26	4.3	1.0	<0.5	0.9	0.18	9.0	8.3	4	262

중간 위치에 구성되어 조영당시부터 견고성을 높였을 것으로 판단된다. 각 토층의 점토 함량비로 볼 때, 토성분포와 대체로 유사한 양상을 보인다. 그러나 백제시대의 판축토층에서 가장 현저한 차이가 있다. 최하단 기반층과 일제강점기 복토층은 모두 점성이 높은 점토를 포함하고 있다(Figure 12).

소왕릉 봉분의 층위를 일제강점기 복토층, 도굴층 및 백제시대 판축층 및 지반층 등으로 분류하여 토양의 지구

화학적 거동특성을 검토하였다. 이들은 평균 SiO_2 (55.24 wt%)와 Al_2O_3 (23.99 wt%) 및 Fe_2O_3 (5.69 wt%)의 함량이 높게 검출되며(Figure 12), 다른 원소는 1 wt% 미만이다. 각 토층의 미량원소 거동특성도 출토위치에 관계없이 모든 토양에서 Ce와 Pb의 함량이 화강암의 평균조성과 유사하게 나타났다.

한편 모든 층준에서 희토류 원소는 부화하며, 경희토

Figure 12. Representative diagrams showing the some material analysis of soil layers from the Sowangneung. Numbers are the same as in those of Figure 3B and Figure 4.

류에서 중회토류로 갈수록 점차 감소하는 유사한 경향이 확인된다. 특히 일제강점기 복토층에서 중회토류가 평탄한 패턴을 보이나, 백제시대 판축층에서는 매우 다양한 기암기가 나타난다. 이와 같이 소왕릉 토층을 구성하는 토양의 지구화학적 거동특성은 거의 일치하나 일부 원소에서 부화와 결핍이 있다. 그러나 전반적으로 지구화학적 거동특성과 매우 일치하는 양상을 보여 동일한 모암을 기원으로 하는 토양을 활용한 것으로 해석할 수 있다.

4.2. 토양산지 및 봉분축조 검토

쌍릉 소왕릉 토층의 산출상태, 입도분포, 토성, 물리적 및 화학적 특성으로 보아 층준에 따라 다소 차이는 있으나 모암과 모재의 성인은 거의 동일한 것으로 확인되었다. 이 결과는 익산지역의 심토 및 표토의 토성과 잘 부합한다. 이를 종합할 때, 소왕릉의 봉분을 조성한 모든 토양은 연구대상 일대의 충적토양에서 자급자족하였을 것으로 판단된다. 또한 일정한 조달체계를 거쳐 수급한 토양

Figure 13. Schematic illustrations showing the presumed construction procedures of burial mound in the Sowangneung.

은 봉분을 조영하기 위해 간단한 정선과 선택적 혼합과정을 거친 것으로 해석하였다.

토층의 재료학적 분석을 근거로 봉분의 축조과정을 검토하였다. 모든 토양은 층위에 따라 구성성분 및 유기물 함량에 약간의 차이가 있으며, 토층별 토성 및 분급도 조금씩 다르나 토양의 모재와 성인은 거의 같은 것으로 나타났다. 소왕릉 일대의 토양은 송정통에 해당하고 표토는 주로 적갈색의 자갈이 없는 양토이며, 심토는 적색의 식양토이다. 이상의 분석 자료를 바탕으로 봉분의 축조과정을 모식도로 제시하였다(Figure 13).

백제시대 지반으로 보이는 최하단 기반층은 점질이 다소 강하고 화강암류의 암편이 존재하여, 송정통의 심토와 아주 유사한 특징을 가진다. 백제시대 토층은 판축기법으로 조성하였으며, 기반층 위로 성질이 조금씩 다른 토양을 비교적 정연하게 교차성토하였다(Figure 13A~13C). 이후 도굴로 봉분과 석실이 훼손되었으며 이를 다시 메우고, 일제강점기에 발굴조사 이후 복토하여 고분의 형태를 유지하였을 것으로 추정된다(Figure 13D~13F).

최하단 기반층 위로 봉분의 최하부 토층은 모래가 많이 섞인 양질사토이며, 백제시대 판축층은 대체로 사양토로 구성하였다. 점성이 강한 점토층을 백제층의 최상부와 중간부에 성토한 것으로 보아, 백제층의 상부를 구성하는 토층은 정선과정을 통해 고운 흙을 사용하여 봉분을 보다 견고하게 조성한 것으로 판단할 수 있다. 또한 석실의 천장 상부에 점토를 성토한 것으로 나타나, 이는 석실로 유입되는 수분을 방지하기 위한 불투수층 역할을 하였을 것

으로 해석하였다.

5. 결 언

1. 쌍릉 소왕릉의 봉분 토층은 하부로부터 기반암 풍화토, 정지층, 백제시대 판축층, 도굴층 및 일제강점기 복토층으로 나눌 수 있다. 각각의 층준을 세분하여 연구용 시료를 확보하고 재료학적 특성을 분석하였다. 이 결과, 모든 토층은 층위에 따라 토색과 구성성분 및 유기물 함량에 약간의 차이가 있으며, 토층별 토성 및 분급도 조금씩 다르나 토양의 모재와 성인은 거의 같은 것으로 해석할 수 있다.

2. 소왕릉 최상위의 일제강점기 발굴 이후 복토한 토층은 양토로 구성하였으며, 최하단 기반층과 유사한 지구화학적 거동특성을 보여 유적 인근의 토양을 다소 정선한 후 활용한 것으로 판단된다. 도굴층의 토양은 심하게 교란되어 일정한 특징이 나타나지 않았으며, 복토층과 인접한 층위에서는 이와 유사한 특징을 보이고, 백제층과 인접한 층위는 백제층과 유사한 특징을 나타냈다.

3. 백제시대 판축층에서 기반층과 접하는 최하부 층위는 모래가 많은 양질사토가 성토되었고 그 위로 모래와 미사의 함량이 높은 사양토가 판축의 주를 이룬다. 백제층의 중앙부와 최상부에는 점토 함량이 많고 일정한 입도를 가진 양토를 사용하였다. 이 판축층은 입경 및 입도누적분포 범위가 넓게 도시되어 고분 축조 당시에 재료의 정선과정을 거친 것으로 해석된다.

4. 소왕릉 토층을 구성하는 토양에는 모든 층위에서 카올리나이트가 확인되었으며, 백제시대 층위에서 결정도가 높았다. 특히 카올리나이트의 결정도가 높은 층위의 토양에서는 고령토로 보이는 우백색 토양이 관찰된다. 여기에는 카올리나이트와 할로이사이트가 결정상으로 산출되는 것으로 보아 고령석을 다량 함유한 점토의 인위적인 첨가가 있었던 것으로 판단된다.

5. 소왕릉의 봉분을 조영하기 위한 토양은 유적 주변의 채토장에서 수급한 심토로서 조성이 조금씩 다른 흑운모 화강암의 풍화퇴적토가 활용된 것으로 보인다. 이 토양은 토색과 토성 및 조성이 조금씩 다르나 근본적으로 동일한 지질학적 작용을 거친 성인이 매우 유사한 모재에서 만들어진 것이다. 백제시대 판축층은 대체로 사양토로 성토되었지만, 중간에 양토를 사용하여 불투수층을 조성하고 최상부를 단단하게 마감한 것으로 나타났다.

사 사

이 연구는 문화재청 국립문화재연구소 문화유산조사 연구사업인 ‘백제 후기 능원 학술조사연구(NRICH-2105-A56F)’의 지원을 받아 수행한 결과임을 명기하며 이에 깊이 감사한다. 또한 현장조사와 시료수습에 적극 협조해 주신 마한백제문화연구소의 이문형 박사님과 김중엽 선생님께 깊은 사의를 표한다.

REFERENCES

- Blair, T.C. and Mcpherson, J.G., 1999, Grain-size and textural classification of coarse sedimentary particles. *Journal of Sedimentary Research*, 69(1), 6-19.
- Folk, R.L. and Ward, W.C., 1957, Brazos river bar: A study in the significance of grain-size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, 27(1), 3-26.
- Folk, R.L., Andrews, P.B. and Andlewis, D.W., 1970, Detrital sedimentary rock classification and nomenclature for use in New Zealand. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 13, 937-968.
- Govindaraju, K., 1989, Compilation of working values and samples description for 272 geostandards. *Geostandards Newsletter*, 13, 1-113.
- Kim, A.R., Lee, C.H., Kim, R.H. and Bok, M.K., 2013, Construction characteristics and physicochemical properties of soil layers from Baekje Dongnamri site in Buyeo, Korea. *Journal of Conservation Science*, 29, 209-221. (in Korean with English abstract)
- Kim, N.J., 2014, The burial type and wooden coffin of Iksan Ssangneung. *Korean Journal of Cultural Heritage Studies*, 47, 162-177. (in Korean with English abstract)
- Kim, R.H., Cho, M.S., Yeon, W., Seo, J.S. and Lee, C.H., 2010, Interpretation of material homogeneity and making techniques of the jar coffins from the Oryangdong kiln site and the Ungokdong tomb site in Naju, Korea. *Journal of Conservation Science*, 26, 229-245. (in Korean with English abstract)
- Kim, R.H., Jung, H.S., Jung, S.H. and Lee, C.H., 2011, Material characteristics and clay source interpretation of the ancient ceramic artifacts from the Wonsinheungdong site in Daejeon, Korea. *Journal of Conservation Science*, 27, 163-179. (in Korean with English abstract)
- Kim, S.D., Yi, J.E., Lee, D.S. and Lee, C.H., 2011, Homogeneity investigation of replace stone for restoration of the Mireuksaji stone pagoda in Iksan, Korea. *Journal of Conservation Science*, 27(2), 211-222. (in Korean with English abstract)
- Lee, C.H. and Jin, H.J., 2016, Physicochemical and archaeometric characteristics of Goryeo period potteries from the Sandongri in Seosan, Korea. *Journal of Conservation Science*, 32, 123-139. (in Korean with English abstract)
- Lee, C.H., Kim, Y.T. and Lee, M.S., 2007, Provenance presumption for rock properties of the Five-storied stone pagoda in the Jeongrimsaji temple site, Buyeo, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 43, 183-196. (in Korean with English abstract)
- Lee, H.S., 2013, A study on Baekje stone-chamber tombs in Hanseong area - focusing on stone tombs at Bangi-dong and Garak-dong in Seoul. *Journal of Baekje Studies*, 10, 45-73. (in Korean with English abstract)
- Lee, M.H., 2019, New awareness of the royal tombs during the Sabi period of Baekje - with a focus on the twin royal tombs (tomb of the great King) in Iksan. *Journal of Paekche Culture*, 61, 5-37. (in Korean with English abstract)
- Lee, S.J., Cho, J.H., Lee, W.Y., Kim, Y.S., Kim, D.H. and Lee, S.J., 2018, A study on the twin tombs of Iksan and the character of the recovered human bones. *Journal of Korean Archaeological Society*, 109, 292-325. (in Korean with English abstract)
- National Institute of Agricultural Sciences, 2021, The soil environment map, <http://soil.rda.go.kr/geoweb/soilmain.do>
- Nockolds, S.R., 1954, Average chemical compositions of some igneous rocks. *Bulletin of the Geological Society of America*, 65, 1007-1032.
- Pearce, J.A., 1983, Role of sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. In Hawkesworth, C.J. and Norry, M.J. (eds.), *Continental Basalts and Mantle Xenolith*, Shiva, Cambridge, 230-

- 249.
- Taylor, S.R. and McLennan, S.M., 1985, The continental crust: Its composition and evolution. Blackwell, Oxford, 312.
- The Research Institute for the Mahan-Baekje Culture, 2019, Excavation report of Ssangneung in Iksan; summary report. Wonkwang University, 1-70. (in Korean)
- Yang, H.J., Lee, C.H., Choi, S.W. and Lee, M.S., 2006, Petrological characteristics and provenance presumption for rock properties of the stone pagoda in Mireuksaji temple site, Iksan, Korea. Journal of the Geological Society of Korea, 42(2), 293-306, (in Korean with English abstract)