

# 풍납토성 성벽 토양의 성분 특성 연구

서민석<sup>a\*</sup> · 이한형<sup>b</sup> · 허준수<sup>a</sup> · 김수경<sup>a</sup> · 유명미<sup>a</sup> · 이성준<sup>c</sup>

<sup>a</sup> 국립문화재연구소 보존과학연구소 · <sup>b</sup> 한국전통문화대학교 보존과학과 · <sup>c</sup> 국립문화재연구소 고고연구소

투고일자 : 2012. 10. 02 · 심사일자 : 2012. 11. 01 · 게재확정일자 : 2012. 11. 13

## 국문초록

본 연구에서는 풍납토성 동성벽 내부토양을 대상으로 색도색차계, XRD, 입도분석기 등을 이용하여 색도, 입도, 주요화학조성, 광물결정구조 등을 분석하였다. 성벽토양은 황갈색, 회황색의 모래 또는 실트질 모래(SW~SC)로 분류되고, 입도와 화학·광물학적 특성이 유사하며, 도로나 활주로 등의 성토재료로 적합한 특성이 확인되었다. 색도, 입도, 화학조성, 강열감량의 4인자를 기준으로 비교분석한 결과, 풍납토성이 위치한 지역의 대조군 토양(PNS)은 성벽축조에 사용되지 않았던 것으로 판단한다. 모든 토양은 풍납토성이 위치한 지역과 지질학적으로 유사한 곳에서 채굴되었던 것으로 추정되지만, 성벽 축조 이전에 분포했던 구지표면의 토양과는 다른 특성을 나타내기 때문에, 유적 주변에 대량채굴이 가능했던 토양분포지가 존재할 것으로 추정된다. 향후 성벽 축조재료의 여러 특성들을 비교·분석하면, 성벽 내부토양의 산지, 축조방법, 보수방법 및 시기 등을 보다 종합적으로 이해할 수 있는 계기가 마련될 것으로 기대한다.

※ 주제어 : 풍납토성, 토양, 성벽, 축조재료, 화학조성, 광물결정구조

## 서론

토양이란 암석의 풍화작용과 이에 분해, 부식되어가는 유기물이 섞여지고 기후, 생물 등의 작용을 받아 변화되며, 그 변화는 환경조건과 평형을 이루기 위해 항상 계속된다. 또한 토양은 자연체로서 얽은 층으로 지구 표면을 덮고 있으며, 알맞은 양의 공기와 물이 들어 있을 때에는 기계적으로 식물을 지지하고 양분의 일부를 공급하여 식물을 길러주는 것으로 정의할 수 있다(조성진 등 2002).

고고학적 토양에 있어서 토양은 유물이나 유적이 포함된 공간이라는 의미 뿐 만 아니라, 그 자체가 유적이 형성된 과정과 당시의 환경, 토양생성 또는 변화 메커니즘에 영향을 준 인간의 활동을 포함하고 있다. 그러므로 토양학적 분석을 이용한 고대사 복원에 관한 연구는 필수적으로 수행해야 하는 고고학적 분야이다. 발굴을 통해 세상에 나온 수많은 유물들은 그 시대의 문화와 사회상을 밝히는데 중요한 지표로 여겨지며, 독특한 문양과 형식은 옛 선조들의 발자취를 가늠할 수 있게 한다. 특히 발굴된 출토 유물들은 잃어버린 시간과 공간을 채워주며 과거의 사실을 현재의 우리 눈으로 새롭게 조형할 수 있게 함으로써 과거의 역사를 이해하는데 매우 중요한 역할을 한다(서민석 등 2004). 그러나 국내 고고학 연구는 출토되어지는 유물이나 유구 중심으로 고대사를 복원하는 방법이 일반적으로 행해지고 있다(김수경 등 2012) 이러한 이유로 현재 한반도 전역에 걸쳐 발굴되어지는 유적지 토양의 구성물질에 대한 분석은 보편적으로 이루어지고 있지 못한 실정이다.

삼국시대 백제의 국가권력 형성을 물질자료로써 보여주는 가장 고고학적인 근거가 바로 풍납토성이다. 이것은 백제 초기 도성의 구조와 운영 원리를 연구할 수 있는 매우 중요한 유적이다. 풍납토성은 자연적인 지역을 최대한 활용해서 기원 후 3세기에 최초의 성벽을 축조하였고, 이후 475년 한성백제가 고구려에 의해 멸망할 때까지 백제의 수도를 방어하는 중요한 기능을 담당하였다(신희권 2002). 풍납토성은 한강변의 충적대지상에 위치한 평지 토성으로, 성벽 하부의 정지작업을 거쳐 성벽의 기초를 형성한 후 그 위에 관측 성토하는 방식을 띠고 있다. 풍납토성

은 한강의 남안에 형성된 자연 사구 위에 성벽을 축조하였는데, 이는 사구지형이 주변의 저지대보다 고도가 높다는 사실을 감안할 때, 최소의 노력으로 최대의 효과를 거두기 위한 불가피한 선택이라 판단된다(신희권 2008).

2011년도 발굴조사에서 확인된 것처럼 풍납토성은 처음 성벽을 축조한 이후 두 번의 증축을 거치면서 성벽의 규모가 확대되었다. 특히 동성벽의 퇴적구조에서 확인할 수 있는 복잡한 층서관계는 성벽의 축조과정과 후퇴적과정 등을 파악할 수 있는 객관적 정보를 제공해준다.

본 연구에서는 국립문화재연구소 고고연구실에서 발굴 중인 풍납토성 동성벽 내부토양을 대상으로 연구하였다. 풍납토성의 성벽축조 선후관계, 보수 방법 그리고 토양의 산지 등 과거사 연구에 중요한 기초자료를 제공하는 것을 목적으로 색도색차계, XRD, 입도분석기 등 다양한 자연과학적 분석방법을 적용하였으며, 이를 통하여 풍납토성 성벽 축조 당시 내부토양의 특성과 토양간 상관관계를 확인하고자 한다.

## 재료 및 방법

본 연구에서는 풍납토성의 토벽에 있는 토양을 이용하였다. 색도분석에는 색도색차계(Spectro-guide, BYK Gardner, Germany), 화학조성분석에는 X-선형광분석기(WDXRF, PANalytical, Netherlands), 광물조성에는 X-선회절분석기(XRD, EMPYREAN, 45kV, 40mA, 6°~70°, PANalytical, Netherlands), 입도분석에는 (PSA, Coulter Corporation, USA) 등을 활용하였으며 세부 내용은 다음과 같다.

### 1. 대상 시료

실험에 사용된 토양은 노출된 토벽을 중심으로 고고학적 층위로 구분되는 지점을 중심으로 서로 혼합되어 오염되지 않도록 구분하여 채취하였다(사진 1). 풍납토성에서 채취한 토양은 토벽을 이루는 토양과 토남으로 추정되는 토양, 그리고 토성 주변부의 대조군 토양으로 총

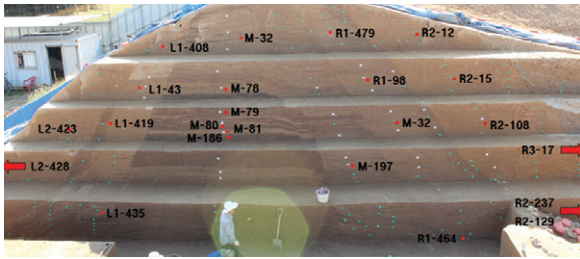


사진 1 풍납토성 토양 시료 채취 위치

26종<sup>01</sup>을 대상으로 실험에 사용하였으며 먼셀 색도 및 육안관찰 특징을 기록하였다(표 1).

## 2. 물리적 특성 분석

풍납토성에서 채취한 토양의 색도 측정은 먼셀토색척을 이용하여 1차 색분석을 하였으며 상세한 색차는 색도 색차계(Spectro-guide, BYK Gardner, Light Source C2, 시야 각 10°, Germany)로 3회 측정된 평균값을 이용하여 표로 나타내었다. 입도분석을 위하여 체가름 입도분석과 레이저 입도분석을 동시에 실시하였다. 체가름 입도분석은 한국공업규격(KS)에서 정하는 입도 분석 시험(KS F 2302)

표 1 풍납토성 토양 시료 목록 및 특징

연번	시료명	채취위치	먼셀 색도 및 육안 관찰 특징
1	M-32	중심축 맨 위	Yellowish Brown(2.5Y 5/3), 반짝이는 운모입자 多, >2mm입자 無
2	M-78	중심축 위에서 두 번째	Yellowish Brown(2.5Y 5/3), 반짝이는 운모입자 有, >2mm입자 無
3	M-79	중심축 위에서 세 번째	Dull yellowish Brown(10YR 5/3), 반짝이는 운모입자 少, >2mm입자 無
4	M-80	중심축 위에서 네 번째	Olive Brown(2.5Y 4/6), 단단하게 뭉침, 반짝이는 운모입자 有, 입자 고움, >2mm입자 無
5	M-81	중심축 위에서 다섯 번째	Olive Brown(2.5Y 4/6), 반짝이는 운모입자 有, >2mm입자 無
6	M-186	중심축 위에서 여섯 번째	Yellowish Brown(2.5Y 5/3), 단단하게 뭉침, 반짝이는 운모입자 有, 입자 고움, >2mm입자 無
7	M-197	중심축의 우측 아래	Dull Yellow(2.5Y 6/3), 반짝이는 운모입자 有, >2mm입자 無
8	L1-408	좌측 첫 번째 맨 위	Yellowish Brown(2.5Y 5/3), 반짝이는 운모입자 多, >2mm입자 無
9	L1-43	좌측 첫 번째 위에서 두 번째	Dark Olive Brown(2.5Y 3/3), 반짝이는 운모입자 少, 입자 뭉침 有 >2mm입자 無
10	L1-419	좌측 첫 번째 위에서 세 번째	Dull Yellow(2.5Y 6/4), 반짝이는 운모입자 多, >2mm입자 無
11	L1-435	좌측 첫 번째 위에서 세 번째	Yellowish Brown(2.5Y 5/3), 반짝이는 운모입자 多, >2mm입자 無
12	R1-479	우측 첫 번째 위에서 첫 번째	Dark Grayish Yellow(2.5Y 4/2), 반짝이는 운모입자 有, >2mm입자 無
13	R1-98	우측 첫 번째 위에서 두 번째	Yellowish Brown(2.5Y 5/3), 반짝이는 운모입자 有, >2mm입자 無
14	R1-371	우측 첫 번째 위에서 세 번째	Dark Olive Brown(2.5Y 3/3), 반짝이는 운모입자 有, 흑색 물질(1×5mm) 有, >2mm입자 無
15	R1-464	우측 첫 번째 맨 아래 바닥부	Dark Grayish Yellow(2.5Y 5/2), 단단하게 뭉침, 반짝이는 운모입자 有, 고운입자, >2mm입자 無
16	L2-423	좌측 두 번째 중단부	Olive Brown(2.5Y 4/4), 반짝이는 운모입자 有, >2mm입자 無
17	L2-428	좌측 두 번째 하단부	Dull Yellow(2.5Y 6/4), 반짝이는 운모입자 有, >2mm입자 無
18	R2-12	우측 두 번째 맨 위	Olive Brown(2.5Y 4/6), 반짝이는 운모입자 少, 입자 뭉침 有 >2mm입자 無
19	R2-15	우측 두 번째 위에서 두 번째	Dull Yellowish Brown(10YR 4/3), 반짝이는 운모입자 有, >2mm입자 無
20	R2-108	우측 두 번째 위에서 세 번째	Yellowish Brown(2.5Y 5/4), 반짝이는 운모입자 少, >2mm입자 無
21	R2-237	우측 두 번째 하단 돌덩이 많은 부분	Dark Olive Brown(2.5Y 3/3), 반짝이는 운모입자 有, 흑갈색 물질 有, >2mm입자 無
22	R2-129	우측 두 번째 하단 돌덩이 많은 부분	Olive Brown(2.5Y 4/6), 반짝이는 운모입자 少, 입자뭉침 有, >2mm입자 無
23	R3-17	우측 세 번째 중단부	Grayish Yellow(2.5Y 6/2), 적갈색 경계면 有, 경계면에만 1~2mm 입자 有, 경계이외의 부분 입자 고움, (0.5mm 입자 有
24	E-523	토낭 추정부	Dull Yellow(2.5Y 6/3), 반짝이는 운모입자 少, >2mm입자 無
25	PNS-1	토성위치 원토	Dark Grayish Yellow(2.5Y 4/2), 반짝이는 운모입자 多, >2mm입자 無
26	PNS-2	토성위치 원토	Dark Grayish Yellow(2.5Y 4/2), 반짝이는 운모입자 多, >2mm입자 無

01 2011년 조사에서 확인된 풍납토성 토성벽의 축조과정은 크게 4단계로 구분이 가능하다. 이 중 1~2단계는 초축성벽 축조를 위한 공정의 선후관계로 판단되지만, 3단계와 4단계는 성벽이 증축되는 활용과정으로 이해된다. 단계별 축조재료로서 토양학적 차이를 판별하는 것은 시기적 차이 또는 공법상 차이를 반영할 수 있다. 그리고 동일 공정 내에서 수직적 위치에 따른 토양학적 차이는 연약지반 침하방지 등 특정구간 내 특수처리를 위한 재료공학적 측면과 관련된다. 이를 위해 총 26개의 시료를 성벽의 축조과정을 고려하여 수습하였고, 분석결과는 토목공학분야 등 학제간 융합연구 수행 연구기관에 제공될 예정이다.

법에 따라 토양 시료를 각각 105℃에서 24시간 건조하고 분쇄하여 전체 무게를 측정된 후 체가름입도분석시험기 (Analysette 3, FRITSCH, Germany)를 이용하여 입도 분석을 실시하였다. 입도 분포의 결정은 <표 2>에 나타난 체를 통과시켜 잔류된 흙의 양을 측정하여 각 체를 통과한 흙의 누적백분율(통과백분율)을 구하였다. 체가름 입도 분석 결과에서 확인된 45 $\mu$ m 이하의 실트질 크기의 미분부 입자들에 대해서 레이저 입도분석기(PSA, LS230 & N4PLUS, Coulter Corporation, USA)<sup>02</sup>를 이용하여 입도 분석을 실시하였다.

### 3. 광물 및 화학조성 분석

X-선회절분석은 PANalytica사의 EMPYREAN을 사용하였으며, 45kV, 40mA, 6° ~ 70°, 0.02°/150sec의 조건으로 분말화한 시료를 Spinning시켜 광물결정구조를 분석하였다. 토양 시료를 분말화하여 용제5g, 박리제 0.02g을 토양시료 0.5g과 함께 넣고 비드머신(Bead machine, K2, Canada)으로 비드를 제작하여 주성분 분석을 파장분산형 X-선형광분석기(X-ray fluorescence, XRF, PHILIPS, Axios, Netherlands)로 수행하였다. 또한 원소에 대한 산화물 함량은 강열감량(L.O.I)값과 함께 총합이 100%로 다시 환산하였다. 강열감량분석은 전기로(Silicaonit Muffle Furnace, APM, Korea)를 이용하여 KS F 2104에 따라 강열감량값을 측정하였다.

표 2 토양 시료의 입도 분석에 사용한 체 번호와 체눈 크기

체 번호	체눈 크기 ( $\mu$ m)
10	2,000
18	1,000
35	500
60	250
200	75
325	45

## 분석 결과

### 1. 풍납토성 토양 색도 분석

풍납토성 토양 시료 26점의 특성을 확인한 결과, 시료들은 올리브 갈색, 황갈색, 회황색의 색상을 보였으며, 시료 토양 중 R3-17은 특이하게 토양 조직 내에서 적색의 경계면 및 경계면에 분포하는 1~2mm의 광물입자가 관찰되어 인위적 요소가 가미된 것으로 판단되었다.

풍납토성 성벽토양은 명도(L\*)는 47~65의 범위를 나타내며, 채도를 나타내는 a\*와 b\*는 각각 4~9와 13~25의 범위를 나타내었다. 또한 색상으로는 올리브 갈색, 황갈색, 회황색 등으로 확인되었다. 이에 따라 풍납토성의 토양은 색도 특성에 따라 4~5개의 그룹으로 구분됨을 알 수 있었다. 명도와 색차를 인자로 한 L\* $\Delta$ E 좌표 상에서 대부분의 시료는 L\*와  $\Delta$ E가 각각 42.98~47.64, 55.70~60.80의 범위에 분포하였다(표 3).

풍납토성의 성벽토양이 아닌 대조군 토양인 PNS와 시료 R3-17은 L\* $\Delta$ E 좌표 상에서 다른 토양들과 떨어져 분포하며, 토양으로 추정되는 토양시료 E-523도 따로 떨어져 위치하고 있다. 대부분의 시료가 분포하는 영역의  $\Delta$ E값과 PNS와 R3-17 등의  $\Delta$ E값이 5이상의 차이를 보여 육안으로도 구분이 가능할 정도의 차이임을 확인할 수 있었으며, 이와 같이 대조군 토양과 성벽토양의 색도분석결과와의 비교는 색도분석결과에 의한 분류의 유의미성을 찾을 수 있다(그림 1).

채도를 나타내는 a\*b\* 좌표 상에서 대부분의 시료는 a\*와 b\*가 각각 7.23~7.47, 20.59~22.38의 범위에 군집하였다. 성벽 중심축을 중심으로 우측 두 번째 벽체에서 채취된 시료 5개(R2-12~129)는 a\*와 b\*가 각각 8.35~8.92, 23.48~25.45인 매우 좁은 영역에 군집하여 채도 특성이 매우 유사함을 보였다(그림 2). 토양 시료 중 원토양인 PNS와 성벽토양 R3-17, R1-464는 적색과 황색 정도를 나타내는 a\*와 b\* 값이 낮게 측정되어 다른 토양들에 비해

02 본 조사에서 실트질 이하 크기의 토양 입자들의 입도분석을 위해 사용한 입도분석기는 작은 입자들에 레이저를 조사하여 회절된 특징적이고 대칭적인 패턴을 입사된 빛의 축과 각도의 함수로서 회절된 빛의 강도를 측정하여 입도 분포를 알아내는 방식을 사용하는 것이다.

표 3 풍납토성 토양 시료 색도 분석 결과

시료명	색도(Lab 표색계)			
	L*	a*	b*	$\Delta E^{03}$
M-32	58.42	8.74	25.45	46.46
M-78	56.72	8.92	24.99	47.64
M-79	64.38	4.11	16.10	35.88
M-80	57.55	7.04	20.98	44.56
M-81	58.44	7.48	22.46	44.61
M-186	57.16	7.10	21.16	44.99
M-197	52.62	7.66	20.21	48.64
L1-408	56.59	7.73	21.81	45.91
L1-43	58.10	6.79	20.59	43.86
L1-419	58.17	7.04	20.76	43.93
L1-435	58.65	8.59	24.73	45.85
R1-479	54.14	8.52	23.48	48.96
R1-98	51.20	7.23	19.40	49.52
R1-371	58.00	6.82	20.33	43.83
R1-464	60.86	8.35	24.82	44.07
L2-423	55.70	6.86	19.99	45.69
L2-428	56.51	7.64	21.65	45.88
R2-12	58.12	7.96	22.38	44.93
R2-15	57.59	7.78	22.39	45.35
R2-108	56.23	7.75	22.50	46.55
R2-237	56.99	7.08	20.43	44.80
R2-129	56.64	5.08	16.12	42.98
R3-17	57.87	6.88	20.71	44.13
E-523	63.89	7.47	23.31	40.62
PNS-1	47.67	4.60	13.23	50.42
PNS-2	48.75	4.72	13.99	49.61
Average	56.81	7.15	20.92	45.37
STD	3.73	1.26	3.15	2.99

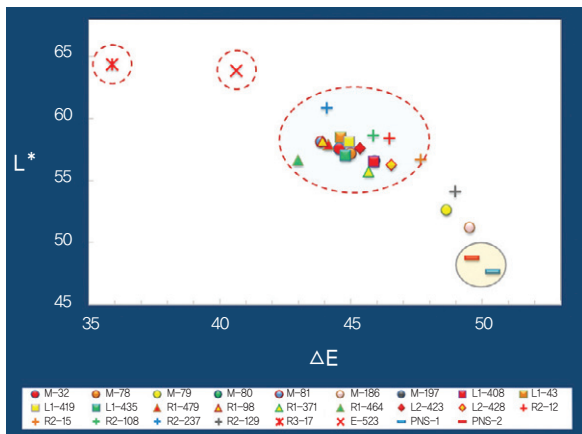


그림 1 L\*- $\Delta E$  좌표상에서의 풍납토성 토양 분포도

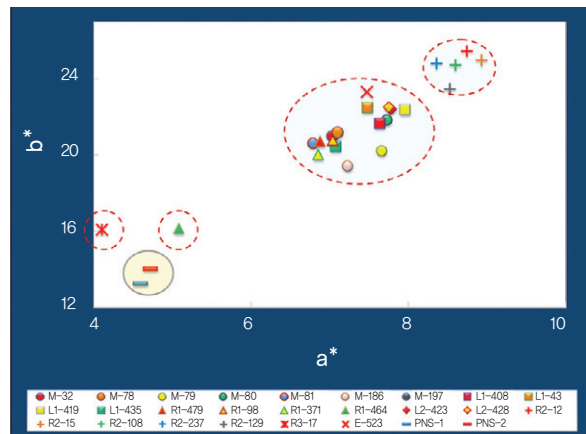


그림 2 a\*-b\* 좌표상에서의 풍납토성 토양 분포도

<sup>03</sup>  $\Delta E$ 는 색도측정 백색표준시료(D65/10°, L\*: 95.96, a:0.71, b\*: -0.24)에 대한 색차이다.  $\Delta E$ 는 한국산업규격(KS A 0063)이 정하는 Lab 표색계에서 색차를 의미하며, 계산식은  $\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2}$ 이다.  $\Delta E$ 가 0.5 이상이면 전문가가 식별가능하며, 1.5이상이면 비전문가도 식별이 가능하다.

회색빛이 강함을 나타내었다.

이러한 L\* $\Delta$ E 및 a\*b\* 좌표 상의 분포특성을 확인한 결과 대조군 토양(PNS)은 토성의 성벽축조 토양과는 색도에 있어 매우 다르며, 우측 세 번째 성벽 토양 역시 대조군 토양이나 다른 성벽토양들과 다름을 확인하였다. 좌측 두 번째 벽체 시료 4개(R2-12, 15, 108, 237)는 색도 특성이 매우 유사하여 동일한 토양이 사용된 것으로 판단되었다.

## 2. 풍납토성 토양 입도 분석

풍납토성 토양시료는 10번 체(체 눈 크기 2,000 $\mu$ m) 통과 백분율이 84~100%이고, 200번 체(체 눈 크기 75 $\mu$ m) 통과백분율이 7~19%이며, 325번 체(체 눈 크기 45 $\mu$ m) 통과백분율이 2~9%로 점토질의 함량이 매우 적은 토양임을 알 수 있었다(표 4). 입도 특성을 기준으로 살펴보면, 모든 토양이 공학적 분류기준인 통일분류법<sup>04</sup>에 의해 모래 또는 실트

표 4 풍납토성 토양 입도 분석 결과

체 눈크기 시료명	잔류분 누적 합계(%)											
	2000 ( $\mu$ m)	1000 ( $\mu$ m)	500 ( $\mu$ m)	250 ( $\mu$ m)	75 ( $\mu$ m)	45 ( $\mu$ m)	<2 <sup>05</sup> ( $\mu$ m)	60%입경 (D <sub>60</sub> )	30%입경 (D <sub>30</sub> )	유효입경 (D <sub>10</sub> )	균등계수 (D <sub>60</sub> /D <sub>10</sub> )	곡률계수 (D <sub>30</sub> <sup>2</sup> /D <sub>60</sub> *D <sub>10</sub> )
M-32	100	97.19	88.63	80.19	42.85	11.64	0.51	130	60	44	2.95	0.63
M-78	100	99.71	98.01	93.54	41.67	14.86	0.28	115	59	42	2.74	0.72
M-79	100	97.10	82.19	66.84	32.07	6.19	0.23	195	70	50	3.90	0.50
M-80	99.68	84.62	62.77	48.8	29.16	7.12	0.32	450	79	50	9.00	0.28
M-81	100	96.71	88.15	79.95	35.34	9.30	0.36	150	68	46	3.26	0.67
M-186	99.73	94.23	78.33	65.14	43.64	11.21	0.65	190	59	43	4.42	0.43
M-197	100	96.22	81.15	68.69	41.74	10.85	0.69	170	60	44	3.86	0.48
L1-408	100	97.88	89.01	79.61	42.56	14.17	0.58	135	59	42	3.21	0.61
L1-43	100	98.87	95.12	87.83	42.90	18.75	0.39	120	56	45	2.67	0.58
L1-419	99.52	86.33	69.30	59.28	40.11	10.58	0.56	135	60	45	3.00	0.59
L1-435	100	94.74	86.00	77.70	36.29	11.26	0.60	160	64	44	3.64	0.58
R1-479	100	95.91	87.05	78.13	43.13	12.62	0.66	130	59	42	3.10	0.64
R1-98	100	97.55	87.12	77.45	41.63	7.62	0.37	140	60	47	2.98	0.55
R1-371	100	93.80	79.52	68.92	42.79	12.58	0.60	165	59	42	3.93	0.50
R1-464	100	94.37	82.16	72.23	42.39	10.38	0.68	160	60	45	3.56	0.50
L2-423	100	96.90	86.48	77.24	45.56	11.82	0.51	130	58	43	3.02	0.60
L2-428	100	91.81	75.56	63.02	34.08	13.51	0.64	220	65	42	5.24	0.46
R2-12	98.62	93.84	81.85	68.28	42.22	17.74	0.24	170	57	37	4.59	0.52
R2-15	99.93	89.18	73.1	61.77	39.96	16.01	0.86	230	59	40	5.75	0.38
R2-108	99.75	92.87	77.98	66.40	38.31	8.60	0.34	185	62	47	3.94	0.44
R2-237	99.25	92.99	79.44	66.40	35.06	10.58	0.52	195	65	44	4.43	0.49
R2-129	100	94.81	85.05	71.17	29.92	9.39	0.50	180	75	46	3.91	0.68
R3-17	99.75	89.69	72.84	56.52	30.69	15.08	0.63	300	70	30	10.00	0.54
E-523	100	93.01	74.73	58.56	37.97	12.97	0.63	270	60	40	6.75	0.33
PNS-1	100	99.78	98.10	93.31	38.87	13.13	0.59	120	62	42	2.86	0.76
PNS-2	100	99.67	97.23	90.57	37.39	14.62	0.54	130	63	41	3.17	0.74

04 통일분류법은 미국의 Casagrande가 1942년에 개발하고 1948년도에 논문으로 제시한 토양 분류법으로 토양의 공학적 특성을 구분하는 분류기준이며, 세계적으로도 많이 이용되고 있는 분류법임

05 레이저 입도분석 결과를 그래프로부터 구한 값으로 다소의 오차를 포함하고 있음

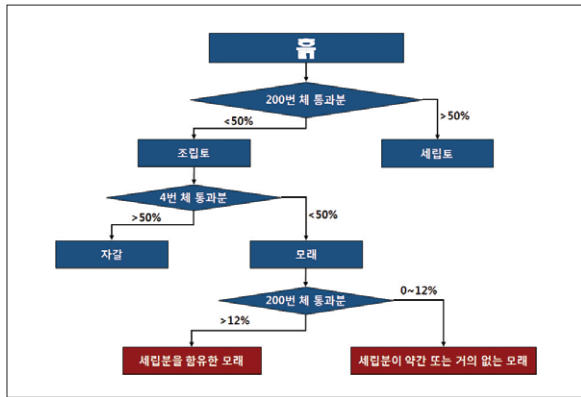


그림 3 통일분류법에 의한 축성토양 분류 순서도

질을 함유한 모래(SW~SC)로 분류되었다(그림 3).

토양 입자의 크기와 분포 측면에서 토양의 공학적 특성을 살펴보면, 토양 시료 25점은 5,000 $\mu$ m 체 통과율 100%, 75 $\mu$ m 체 통과율 6~19%로 모두 건설교통부의 성토재료 및 한국도로공사 성토재료 품질기준<sup>06</sup>에 적합한 재료에 해당되며, 점토입자(2 $\mu$ m)의 함량이 모두 1%이하로서 점착성은 없을 것으로 판단되었다. 풍납토성 성벽 토양 시료는 모두 입도특성 면에서 매우 유사한 특징을 보이고 있으며, 현대의 품질기준으로 보더라도 성벽 축조를 위해서 적합한 토양으로 확인되었다.

### 3. 풍납토성 토양 화학조성 분석

풍납토성 토양 시료의 화학조성을 위하여 XRF 분석 결과, SiO<sub>2</sub>가 대략 62~68wt.%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 대략 14~19%의 분포를 보이며, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 대략 4~7 wt.%를 나타내어 일반적인 토양<sup>07</sup>보다 SiO<sub>2</sub>의 함량이 다소 높은 특징을 나타내었다(표 5). 화강암의 평균함량(Nockolds, 1954)<sup>08</sup>을 기준으로 토양의 지구화학적 거동 특성을 비교하였을 경우, 모든 토양에서 주성분의 부화와 결핍의 거동이 유사한 특징을 보였다(그림 4). A-CNK-FM 삼각다이어그램을 통해 살펴본 토양의 점토광물화 정도는 풍납토성 토양 시

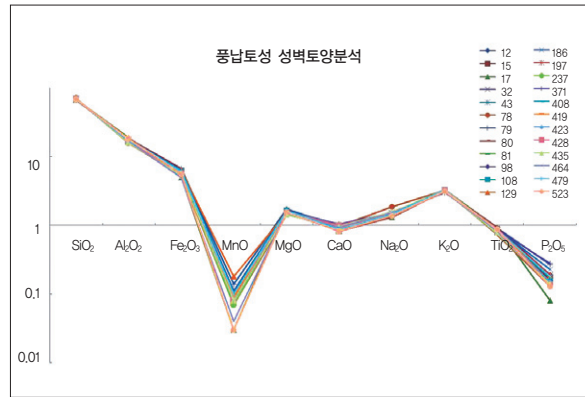


그림 4 화강암 평균 기준 지구화학적 거동 비교

료 모두 유사한 특징을 보였다(그림 5).

주성분원소를 제겔식(Sege Formula)<sup>09</sup>에 따라 알칼리성산화물과 산성산화물로 구분하고 이들의 좌표 상에서 토양시료들의 분포 특성을 관찰한 결과 토양시료 대부분은 RO+R<sub>2</sub>O와 RO<sub>2</sub>가 각각 0.5~0.65, 5.0~7.0인 비교적 좁은 영역에 군집하며, M-78과 PNS만이 중심그룹에서 약간 분리되어 분포하였다. 제겔식으로 나타낸 토양의 화학조성비에서 중성산화물에 대한 산성산화물의 비율이 1 정도의 범위내에 있으므로 토양의 특성을 구분할 정도로 큰 변화라고 보긴 어렵다. 따라서 대조군(PNS)과 M-78 토양을 제외한 대다수의 토양 시료들이 유사성이 있는 것으로 판단하였다(그림 6). 그리고 대조군 역시 성벽토

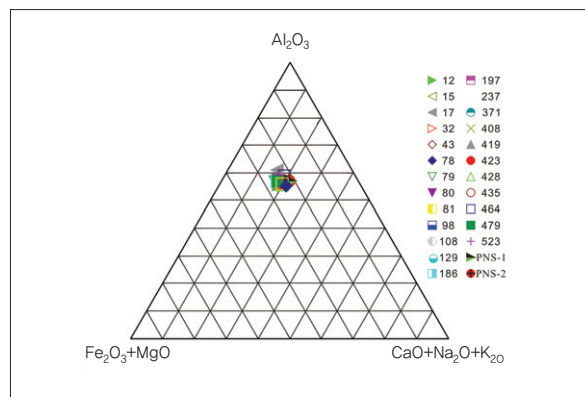


그림 5 A-CNK-FM 삼각다이어그램에서의 토양 분포

<sup>06</sup> 도로의 안정성을 고려한 도로포장 하부 성토재료의 품질기준

<sup>07</sup> 토양의 화학적 조성의 함량 순위는 지각의 조성과 비슷하며, 대체로 SiO<sub>2</sub> 50~60%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 20%, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+FeO 10%, 강염기류 5% 내외이다. 한국지하수토양환경학회, 2001, 토양환경공학, 향문사, p.22.

<sup>08</sup> Nockolds, S.R., 1954, Average chemical composition of some igneous rocks. *Geological Society of American Bulletin*, 65, pp.1007~1032.

<sup>09</sup> 토양의 주요화학조성을 산성산화물, 중성산화물, 염기성산화물로 분류하고 중성산화물에 대한 산성 및 염기성산화물의 몰비를 좌표를 이용하여 토양들의 분포를 관찰함

표 5 풍납토성 토양 화학조성 결과

Sample No.	주요화학조성(%)												Seger Formula <sup>12</sup>	
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MgO	CaO	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	L.O.I.	Total	RO <sub>2</sub>	RO+R <sub>2</sub> O
M-32	65.41	16.20	5.59	1.40	3.07	1.42	0.81	0.76	0.16	0.10	5.07	100	5.67	0.55
M-78	67.51	15.15	5.07	1.79	3.11	1.37	0.92	0.70	0.12	0.07	4.18	100	6.29	0.63
M-79	66.44	18.33	6.68	1.49	3.02	1.75	0.96	0.92	0.27	0.14	6.79	100	5.05	0.54
M-80	62.61	17.11	6.28	1.24	2.97	1.61	0.77	0.88	0.18	0.09	6.26	100	5.09	0.51
M-81	66.90	15.54	5.32	1.46	3.14	1.41	0.87	0.75	0.13	0.08	4.39	100	6.05	0.58
M-186	62.85	16.88	5.96	1.34	3.00	1.51	0.88	0.82	0.22	0.10	6.44	100	5.22	0.53
M-197	65.04	16.42	5.69	1.35	2.91	1.49	0.82	0.82	0.18	0.09	5.20	100	5.57	0.54
L1-408	65.71	15.99	5.59	1.41	3.21	1.37	0.93	0.73	0.14	0.08	4.85	100	5.76	0.57
L1-43	66.57	15.70	5.46	1.46	2.95	1.43	0.87	0.74	0.13	0.08	4.62	100	5.94	0.57
L1-419	64.81	16.40	5.72	1.38	3.10	1.51	0.85	0.82	0.14	0.09	5.19	100	5.54	0.55
L1-435	67.30	15.29	5.06	1.51	3.04	1.36	0.91	0.73	0.13	0.08	4.59	100	6.22	0.59
L2-423	65.56	15.84	5.61	1.45	2.99	1.52	0.93	0.78	0.14	0.08	5.10	100	5.43	0.54
L2-428	66.17	15.61	5.43	1.44	3.14	1.47	0.95	0.77	0.13	0.08	4.82	100	5.35	0.53
R1-479	64.08	16.54	5.80	1.37	3.03	1.52	0.81	0.81	0.17	0.09	5.77	100	5.63	0.57
R1-98	63.68	16.63	5.95	1.34	2.98	1.51	0.83	0.84	0.18	0.10	5.96	100	5.90	0.57
R1-371	64.78	16.18	5.62	1.44	2.89	1.52	0.98	0.81	0.26	0.08	5.44	100	5.79	0.58
R1-464	66.29	16.27	4.69	1.44	2.91	1.49	0.88	0.80	0.12	0.04	5.06	100	5.95	0.59
R2-12	64.24	16.46	6.05	1.41	3.15	1.59	0.96	0.83	0.16	0.10	5.06	100	5.42	0.57
R2-15	64.79	16.26	5.86	1.38	3.13	1.52	0.91	0.82	0.15	0.09	5.09	100	5.56	0.56
R2-108	64.72	16.43	5.86	1.39	3.13	1.57	0.94	0.83	0.16	0.08	4.91	100	5.51	0.57
R2-237	65.22	16.28	5.54	1.39	3.08	1.47	0.87	0.80	0.13	0.07	5.15	100	5.64	0.56
R2-129	64.91	16.24	6.04	1.39	3.06	1.47	0.94	0.78	0.18	0.17	4.82	100	5.54	0.56
R3-17	64.00	18.03	4.75	1.25	3.12	1.64	0.78	0.88	0.08	0.03	5.45	100	5.21	0.52
E-523	68.30	18.21	5.57	1.37	3.12	1.57	0.82	0.89	0.13	0.03	5.06	100	5.38	0.51
PNS-1	68.45	14.80	4.30	1.57	3.11	1.25	0.92	0.65	0.16	0.07	4.71	100	6.68	0.62
PNS-2	68.50	14.81	4.37	1.59	3.04	1.27	0.94	0.67	0.17	0.07	4.59	100	6.66	0.62
<b>Average</b>	<b>65.57</b>	<b>16.29</b>	<b>5.53</b>	<b>1.42</b>	<b>3.05</b>	<b>1.48</b>	<b>0.89</b>	<b>0.79</b>	<b>0.16</b>	<b>0.08</b>	<b>4.72</b>	<b>100</b>	<b>0.77</b>	<b>0.77</b>
<b>STD</b>	<b>1.61</b>	<b>0.91</b>	<b>0.56</b>	<b>0.11</b>	<b>0.08</b>	<b>0.11</b>	<b>0.06</b>	<b>0.07</b>	<b>0.04</b>	<b>0.03</b>	<b>1.49</b>	<b>0</b>	<b>0.62</b>	<b>0.62</b>

양과 미세한 차이만이 확인되었기 때문에 주요 화학조성만으로 대조군토양과 성벽토양의 유의미한 비교를 할 수는 없었으며 추가적으로 미량성분 분석 등의 연구가 필요할 것으로 사료된다.

축성토양의 유기물 함량을 확인하기 위하여 강열감량(L.O.I, Loss on Ignition)<sup>10</sup>을 측정된 결과 4~7%의 강열감량을 나타냈으며, 토양 색상과의 비교를 위하여 L, O, H\* 좌

표상에서 분포를 확인해 보면 명도와 강열감량 사이의 반비례 현상<sup>11</sup>은 뚜렷이 나타나지 않음을 알 수 있었다(그림 7). 이러한 결과는 축성토양의 색상이 유기물함량보다는 구성광물종이나, 화학조성, 수분함량(결합수) 등에 영향 받고 있다고 볼 수 있다.

이상 토양들의 주요화학조성과 강열감량 특성을 관찰한 결과, 토성축조 토양은 지구화학특성과 점토화

<sup>10</sup> 흙의 강열감량이란, (110±)°C로 노(爐)건조된 흙에 700~800°C의 강한 열을 가하였을 때의 감소된 질량을 노 건조된 흙의 질량에 대한 백분율로 나타낸 것을 말한다. 한국산업규격 KS F 2104

<sup>11</sup> 결합수(combined water)는 토양입자와 화학적으로 결합되어 있는 수분으로서 pH는 7.0이상이며, 100~110°C로 가열해도 증발·분리되지 않는다. 한국지하수토양환경학회, 2001, 토양환경공학, 향문사, p.22.

<sup>12</sup> 토양을 구성하는 주요화합물들은 산성산화물(RO<sub>2</sub>), 중성산화물(R<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), 염기성산화물(RO+R<sub>2</sub>O)로 구분하고 중성산화물의 몰비를 기준으로 산성산화물과 염기성산화물의 몰비를 계산





표 6 풍납토성 토양의 광물결정구조 결과

시료명	주요 검출 광물					
	Q	M	S+C	K+C	A-f	PI
M-32	○	○	○	○	○	○
M-78	○	○	○	○	○	○
M-79	○	○	○	○	○	○
M-80	○	○	○	○	○	○
M-81	○	○	○	○	○	○
M-186	○	○	○	○	○	○
M-197	○	○	○	○	○	○
L1-408	○	○	○	○	○	○
L1-43	○	○	○	○	○	○
L1-419	○	○	○	○	○	○
L1-435	○	○	○	○	○	○
R1-479	○	○	○	○	○	○
R1-98	○	○	○	○	○	○
R1-371	○	○	○	○	○	○
R1-464	○	○	○	○	○	○
L2-423	○	○	○	○	○	○
L2-428	○	○	○	○	○	○
R2-12	○	○	○	○	○	○
R2-15	○	○	○	○	○	○
R2-108	○	○	○	○	○	○
R2-237	○	○	○	○	○	○
R2-129	○	○	○	○	○	○
R3-17	○	○	○	○	○	○
E-523	○	○	○	○	○	○
PNS-1	○	○	○	○	○	○
PNS-2	○	○	○	○	○	○

풍납토성 성벽토양은 2,000 $\mu\text{m}$ 이하 입자를 84%이상 함유한 1~10,000 $\mu\text{m}$  범위의 입자로 구성되며, 75 $\mu\text{m}$ 이하의 입자비율이 5~20%이고, 점토(2 $\mu\text{m}$ 이하) 입자가 1%미만으로 토양의 통일분류법에 따라 모래 또는 실트질을 함유한 모래로 분류되었다. 시료로 사용된 성벽토양 모두 입도특성 면에서 매우 유사한 특징을 보이며, 건설교통부 및 한국도로공사 성토재료 품질기준에 적합한 재료에 해당되었다. 성벽토양은 SiO<sub>2</sub> 62~68wt.%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 14~19%, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 4~7 wt.%의 조성으로 일반적인 토양보다 SiO<sub>2</sub>의 함량이 다소 높은 특징을 나타내었으며, 화강암의 평균치를 기준으로 살펴본 지구화학적 거동 특성은 사용된 성벽토양 시료 모두에서 거의 일치하였다. 화강암의 평균치를 기준으로 한 지구화학적 거동 특성과 A-CN-K-FM 삼각다이어그램을 이용한 점토광물화 정도 등의 특징이 성벽토양 모두에서 유

사한 패턴을 보였다. 또한, 색도와 강열감량의 반비례 관계가 관찰되지 않아 토양들 간의 색상 차이가 유기물함량 보다는 다른 요인(구성광물종, 화학조성, 수분함량 등)에 의해 영향을 받고 있다고 볼 수 있었다. 풍납토성 성벽토양에 대한 광물결정구조 분석결과, 석영, 사장석, 알칼리장석, 운모, 카올리나이트 또는 녹니석 등의 광물종이 동정되어 성벽토양은 주변지질을 이루는 편암 및 편마암류의 풍화산물로 추정되며, 시료로 사용된 성벽토양 모두에서 일치되는 결과를 얻을 수 있었다.

이러한 결과를 통하여 풍납토성 성벽토양은 현대에서도 사용되고 있는 성토재료로써 적합한 특성을 가지고 있기에 당시에 성벽을 구성하는 토양으로 활용되었다고 볼 수 있다. 또한 색도, 입도, 화학조성, 강열감량의 4인자를 기준으로 풍납토성 내부의 토양은 성벽축조에 사

용되지 않았을 것으로 판단된다. 모든 토양은 풍납토성이 위치한 지역과 지질학적으로 유사한 곳에서 채출된 것으로 추정되지만, 풍납토성 내부의 토양과는 다른 특성을 나타내기에 아마도 대량으로 채굴하여 동일한 특성을 나타낼 수 있는 토양분포지가 주변에 존재할 것으로 사료된다. 향후에는 이러한 토성을 축성할 수 있는 토양의 산지에 대한 연구가 필요할 것이며, 더 나아가 배수와 구조물의 안정성을 위한 토양을 선별한 축조방법에

대한 연구도 요구되고 있다. 따라서 본 논문에서 얻어진 데이터를 기준으로 풍납토성 성벽토양의 특성(색상, 입도, 화학 조성, 강열감량 등)에 따른 분류를 위하여 특성인자 좌표 상에서의 분포 비교와 Decision에 의한 분류를 수행하고자 한다. 이는 성벽을 축성한 토양의 여러 특성들을 종합적으로 비교분석해서 풍납토성 성벽토양의 산지 추정, 위치별 축조방법, 보수방법 및 보수시기 등을 보다 정확하게 이해할 수 있을 것으로 사료된다.

---

## 참고문헌

---

- 조성진 · 엄대익, 2002, 『사정 토양학』, 향문사
- 서민석 · 김민희 · 정용재, 2004, 「고대 토양의 과학적 분석에 대한 고찰」 『문화재지』 제37호, pp.309~326.
- 김수경 · 한이현 · 허준수 · 한민수 · 이한형 · 문은정 · 서민석, 2012, 「연천 합수리 유적 출토 토기 · 토양의 광물학 및 지구화학적 특성」 『문화재지』 vol.45, No.1, pp.102~121.
- 신희권, 2002, 「풍납토성 축조연대 시론」 『한국상고사학보』 제37호, pp.29~51.
- 신희권, 2008, 「中韓 古代 築城方法 比較 研究」 『호서고고학』 제18호, pp.56~77.
- Casagrande, A., 1948, Classification and Identification of Soils, *Transactions, ASCE*, vol. 113, pp.901~930.
- 한국지하수토양환경학회, 2001, 『토양환경공학』, 향문사
- Nockolds, S.R., 1954, Average chemical composition of some igneous rocks, *Geological Society of American Bulletin*, 65, pp.1007~1032.

# Compositional Characterization Analysis of Wall Soils Excavated in Poongnatoseong Earthen Castle, Seoul

Seo, Min Seok<sup>a\*\*</sup> · Lee, Han Hyeong<sup>b</sup> · Hu, Jun Soo<sup>a</sup> · Kim, Soo Keung<sup>a</sup> · Yoo, Young Mi<sup>a</sup> · Lee, Seong Jun<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Conservation Science Division, National Research Institute of Cultural Properties · <sup>b</sup>Department of Conservation Science, Korea National University of Cultural Heritage

<sup>c</sup>Archaeology Division, National Research Institute of Cultural Properties

Received : 2012. 10. 02 · Revised : 2012. 11. 01 · Accepted : 2012. 11. 13

## ABSTRACT

The purpose of this study is to analysis chromaticity, granulometry, main chemical composition and mineral crystal structure of wall soils excavated from Poongnatoseong Earthen Castle using color reader, XRD, particla size analyzer.

The analysed soils of Poongnatoseong Earthen Castle were yellowish brown and isabella. All samples were sands or sands including silty soil(SW~SC) and showed similar granulometry, chemical composition and mineral crystal structure, which were characteristics of construction materials suitable for modern road or airstrip.

As resulting in comparison with 4 factors from chromaticity, granulometry, main chemical composition and mineral crystal structure, we decided that the control soils(PNS) near by Poongnatoseong Earthen Castle were not to be used for the castle wall construction

We presumed that there was a huge soil distribution area for the wall construction around Poongnatoseong Earthen Castle.

For further study, we will make a comparison analysis all kinds of soil characteristics. And then we can understand correctly about wall soils producing area, construction method, repair method and time of Poongnatoseong Earthen Castle.

**Key Words** Poongnatoseong Earthen Castle, Soil, Castle Wall, Chemical Composition, Mineral Crystal Structure