자원환경지질, 제43권, 제6호, 543-553, 2010
Econ. Environ. Geol., 43(6), 543-553, 2010

백제 와전재료로서 정동리 고토양의 광물 및 지구화학적 특성

장성윤[1] · 이찬희[2*]

[1]국립문화재연구소 복원기술연구실, [2]공주대학교 문화재보존과학과

Mineralogical and Geochemical Characteristics of Ancient Field Soil in Jeongdongri as Ceramic Raw Materials of the Baekje Kingdom

Sungyoon Jang[1] and Chan Hee Lee[2*]

[1]Restoration Technology Division, National Research Institute of Cultural Heritage, Daejeon, 305-380, Korea
[2]Department of Cultural Heritage Conservation Sciences, Kongju National University, Gongju, 314-701, Korea

This study was focused on the mineralogical and geochemical characteristics of field soil of the Baekje Kingdom from Kwongbawigol site in Jeongdongri, Buyeo and whether the bricks from Songsanri Tombs and Muryung's Royal Tomb were made of soil from this site. Soil samples show the similar size fraction as a silt loam and acidic soil, whereas some samples have the enrichment of organic matter, P and S. Also, they have similar geochemical behavior of elements and similar mineral phases consisting of quartz, plagioclase, orthoclase, vermiculite, mica and kaolinite. The enrichment of iron oxide is found in some soil layer, including the iron oxide mottling and precipitation along plant roots and they are attributed to repeat oxidation and reduction environments due to flooding and drainage of field soil. It's anthropogenic alteration by human activity. Especially, it is assumed that the concentration of the iron oxides found in bricks from Muryung's Royal Tomb and Songsanri Tombs is the additional evidence that soil in this study is probably the raw materials of those bricks.

Key words : Jeongdongri, field soil, Muryung's Royal Tomb, raw material provenance, iron oxides

이 연구는 부여 정동리 꽹바윗골 유적에서 출토된 백제시대 경작토양의 광물학적 및 지구화학적 특징을 조사하고, 이를 사용하여 제작한 것으로 추정되는 무령왕릉 및 송산리 전(벽돌)과 토양을 비교하여 태토로서의 가능성을 검토하였다. 연구대상 토양시료들은 모두 미사질 양토로 가장 하부층을 제외하고는 모두 유사한 토양입도를 가지고 있다. 토양은 산성으로 일부 시료에서 유기물, P, S 등의 집적현상이 나타났다. 또한 지구화학적 원소 분포경향이 유사하며 석영, 사장석, 정장석, 질석, 운모, 고령석 등으로 구성되어 동일한 광물조성을 보인다. 부분적으로 붉은 철산화물의 농집이 관찰되는데, 강의 범람과 배수에 따른 산화와 환원환경이 반복되었던 환경이 토양 내 철산화물의 농집을 일으킨 것으로 보인다. 이는 자연현상과 인간의 경작활동에 의한 풍화양상으로 볼 수 있다. 특히 무령왕릉과 송산리고분군 출토 전에서 발견되는 철산화물의 농집현상은 연구지역 토양이 전의 태토로 추정될 수 있는 추가적인 증거로 판단된다.

주요어 : 정동리, 경작토양, 무령왕릉, 태토산지, 철산화물

1. 서 론

최근 유적의 발굴이 활발히 진행되면서 역사시대 경작유적의 발굴도 증가하고 있다. 경작유적은 주변에 상당한 규모의 생활유적이 있었음을 시사하며 생산활동과 더불어 경제활동을 추정해 볼 수 있는 중요한 자료이다(Park *et al.*, 2004a). 백제의 경작유적은 부여 구봉 노화리 유적, 대전 노은동 유적, 부여 합송리 유적 등에서 발굴되었다.

이들은 주로 출토 유물로 시기가 판단되었고, 토양색과 입도에 따른 층위구분, 토양의 미세형태 관찰 그리고 식물 규소체(plant opal)를 통한 식물종의 파악

*Corresponding author: chanlee@kongju.ac.kr

등에 의해 시기와 당시 경작환경을 유추하는 연구가 진행된 바 있다(Park *et al.*, 2004a; 2004b; 2004c). 그러나 토양의 형성과 발달은 인간 활동에 의해 영향을 받으므로 경작토양에 대한 심도있는 재료학적 연구는 선조들의 생활을 설명하는데 중요한 자료를 제공해 줄 것으로 기대된다.

이 연구에서는 부여 정동리에서 발굴 조사된 꿩바윗골 유적을 대상으로 백제시대 경작토양의 광물학적 및 지구화학적 분석을 통해 당시 토양층의 특징을 고찰하였다. 또한 유적 인근에 위치한 정동리 가마터에서 출토된 전(벽돌)과 비교하여 고대 와전(瓦塼) 재료산지로서의 가능성을 검토해 보고자 한다.

2. 연구대상 및 방법

2.1. 연구지역

부여 정동리 백제 큰길 연결도로 건설공사구간 내 오얏골과 꿩바윗골 지점에서 백제 및 조선시대 경작지가 발굴되었다. 오얏골 지점과 꿩바윗골 1지점에서는 조선시대 문화층이 확인되었고 꿩바윗골 2지점에서는 백제시대 문화층이 확인되었다(Lee *et al.* 2008; Hwang, 2008).

백제시대 경작층은 기본적으로 풍화토와 함께 금강 범람 등으로 인한 하성퇴적층으로 구성되어 있다. 이 층의 상부는 부분적으로 풍화토가 섞인 사점질토로 피복된 반면, 하부는 점성이 강한 회갈색의 미사점질토이다.

부여 정동리 꿩바윗골 조사지역의 지형도와 지질도가 Fig. 1에 있다. 이 지역은 해발고도가 낮은 구릉지, 구릉지 사이의 곡저평야 그리고 금강에 의해 형성된 범람원으로 이루어져 있다. 범람원은 자연제방과 배후습지로 구분할 수 있는데 발굴조사는 자연제방 지역에서 실시되었다(Fig. 1A).

부여 정동리 일대의 지질은 선캠브리아기의 변성암류와 후기 트라이아스기에서 전기 쥬라기 대동누층군의 퇴적암류 및 변성암류로 구성되어 있다(Fig. 1B). 또한 중생대의 쥬라기 화강암과 백악기의 맥암류가 곳곳에서 이들을 관입하였다(COE, 1994). 정동리는 부여읍의 북동쪽에 위치하고 있는데 이 일대는 흑운모화강암이 넓게 산재하고 있으며, 이 암석은 금강을 경계로 동쪽에서 우세한 분포를 보인다.

2.2. 시료준비

꿩바윗골 2지점에서는 백제시대 경작유구와 생활유구 등이 해발 6.5~8.5 m에 걸쳐 확인되었다. 백제시대 경작토양은 하부로부터 I, II, III층으로 구분되는데,

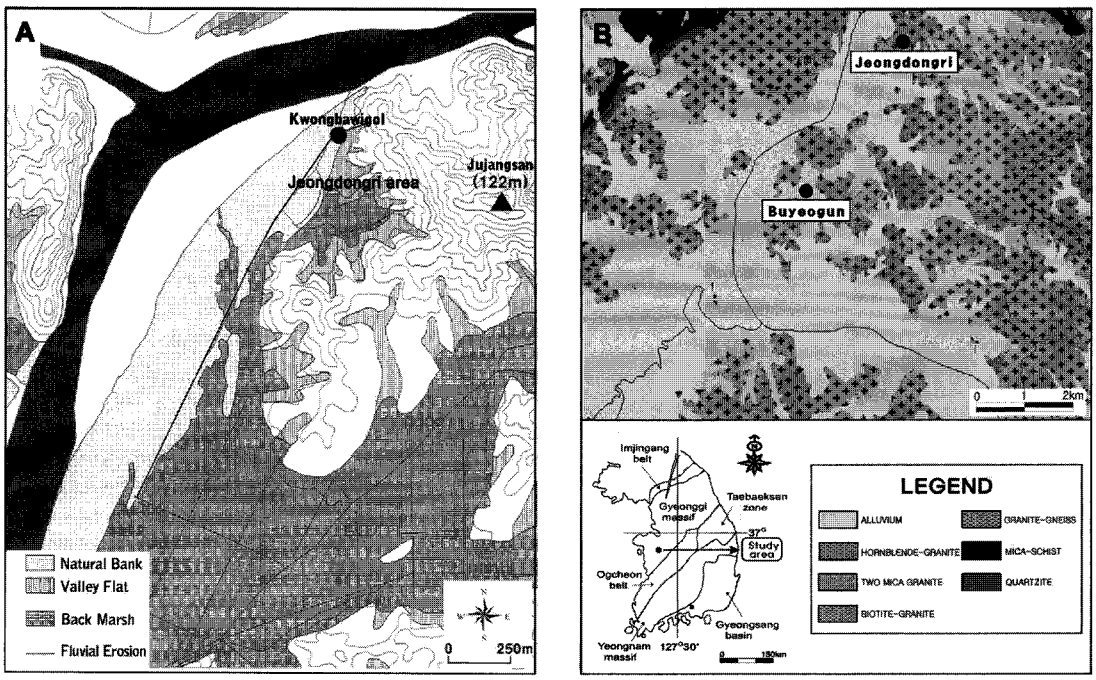

Fig. 1. Geographic and geological maps of the Jeongdongri in Buyeo area(Hwang, 2008).

Table 1. Soil color and descriptions of the samples

No.	Soil color	Descriptions
JD-0	10YR 6/4	Unconsolidated parent material
JD-1	2.5YR 3/3	Baekje I Layer
JD-2	2.5YR 4/2	Baekje II Layer
JD-3	2.5YR 4/4	Baekje III Layer
JD-4	2.5YR 5/4	Baekje IV Layer
JD-5	2.5YR 5/4	Baekje V Layer

I층의 생활유구는 미구릉부 남쪽을 중심으로 건물지 1동, 원형수혈 9기가 분포하고 있으며 북사면을 따라서는 경작유구 1식이 발견되었다.

II층은 미구릉부를 중심으로 주변에 완만하게 범람퇴적이 일어난 후 경작유구가 분포되어 있다. III층의 경작유구는 거의 수평에 가깝게 조성되어 미구릉부 정상부근에서 단차를 두고 상하단의 경작유구가 조성되어 있다. 하단 경작유구에서는 내부 통행로 및 둑 등의 경계를 이루며 4개의 경작지가 확인되었다(Lee *et al.*, 2008).

이 연구에서는 꿩바윗골 2지점 백제시대 경작유구 상단 남쪽 미능선부에서 각 토양 깊이별로 색과 입도에 따라 시료를 채취하였다. 이 지점은 하성퇴적물이 비교적 두껍게 조성되어졌고 기반암에서부터 백제시대의 I, II, III층을 포함하고 있다. 각 토양시료의 위치와 특징은 Table 1과 Fig. 2에 제시하였다.

2.3. 연구방법

경작토양의 연구는 산출상태 조사, 토성 및 광물분석, 화학분석으로 나누어 수행하였다. 토양의 산출상태는 실체현미경 관찰(Leica MZ-75, Switzerland)과 에너지 분산형 분광분석기를 장착한 주사전자현미경(JEOL, JSM-5910LV, Japan) 조사를 병행하여 미세조직을 관찰하고 성분을 확인하였다. 또한 전암대자율 분석기(KT-6, Pocket Susceptibility Meter)로 토양의 미세자기적 특징을 분석하였다.

토성 및 광물분석은 Jackson(1969)의 실험방법에 따라 토양 pH를 측정하고 전기전도도(Thermoscientific Orion 4star, USA)와 양이온, 음이온 농도(Dionex ICS-3000, USA)를 측정하였다. 토양은 24시간 교반한 후 과산화수소와 DCB(dithionite-citrate-bicarbonate)로 유기물과 철산화물을 제거한 후(Jackson, 1969; White and Dixon, 2003), 습식체거름과 레이저 입도분석기(Malvern, Mastersizer 2000S, UK)로 모래(sand), 미사(silt), 점토(clay)의 함량을 분석하였다.

또한 토양의 광물동정을 위해 정방위 및 부정방위 분석법으로 X-선회절분석(Mac Science, M18XAHF22, Microarea X-ray diffraction system, Japan; CuKα, 전압 20 kV, 전류 90 mA, 주사속도 1° 2θ/min, 정방위시료 3~30° 2θ 구간, 부정방위시료 3~70° 2θ 구간)을 수행하였다. 정방위 분석은 시료의 점토만 분리하여 건조상태, ethyleneglycol 포화상태, 300°C, 550°C 열처리 후 X-선 회절분석을 수행하여 점토광물의 종류를 동정하였다(Moon, 1995).

시료의 주성분, 미량 및 희토류 원소의 함량은 X-선 형광분석기(RIX 2100), 유도결합플라즈마 분광분석기(OPTIMA 3300, ICP-MS; ELAN 6000) 및 중성자방사화분석기(INAA)로 정량분석하였다.

3. 결과 및 해석

3.1. 산출상태와 미세조직

토양시료는 층위에 따라 색과 입도에서 큰 차이를 보이는데 특히 붉은 철산화물의 분포형태와 경향이 다르다. Fig. 3A는 JD-1 시료로 적갈색 점토질 토양에 붉은 철산화물이 집적되어 토양에 선형으로 배열되어

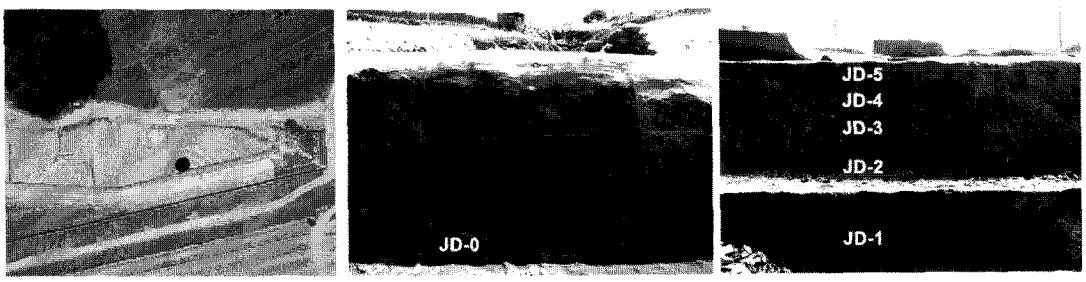

Fig. 2. Location and soil profile for this study.

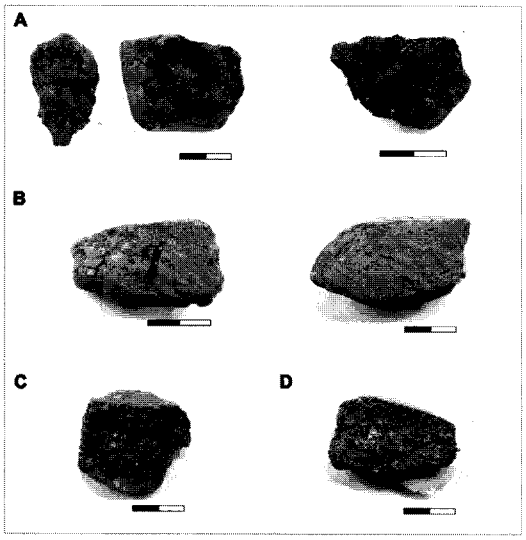

Fig. 3. Microtexture of the soil samples showing different accumulation patterns of reddish iron oxides from the Jeongdongri area. Bar scales are 1 cm. (A) JD-1, (B) JD-2, (C) JD-3, (D) JD-4.

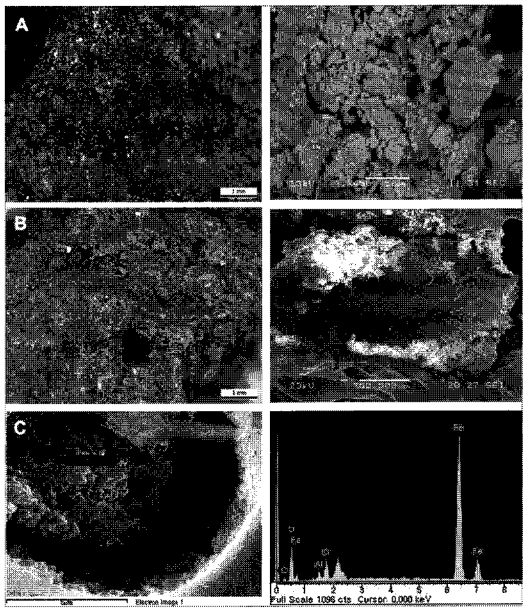

Fig. 4. Microphotographs and SEM images of various type for iron oxides in the soil samples showing iron oxides intergrowth of clay minerals (A), coating soil pores of plant root remains (B) and iron oxides mottling (C).

있다. 3B는 JD-2로 회갈색의 토양에 주로 식물뿌리를 따라 붉은 철산화물이 집적되어 분포하고 있다. 그러나 JD-1과 같은 선형 배열은 발견되지 않았다. Fig. 3C와 3D는 각각 JD-3, 4로 거친 사질토양으로 구성되어 있으며 위와 같은 철산화물의 집적현상은 발견되지 않았다.

한편 토양 내에 함유되어 있는 자철석의 함량으로 토양의 미세자기적 성격을 파악하기 위해 전암대자율을 분석하였다. 이 결과, 모든 토양시료는 1 이하의 낮은 대자율 분포를 가져 자철석 함유량이 매우 낮은 것으로 나타났다.

철의 집적현상을 확인하기 위해 일부 토양시료의 미세조직을 주사전자현미경으로 관찰하였다(Fig. 4). JD-1에서 관찰되는 붉은 선형의 산화물을 EDS로 분석한 결과 철산화물 함량이 높은 토양으로 나타났으며, 토양의 점토광물 사이로 철 산화물의 성장이 관찰되었다(Fig. 4A). JD-2에서는 식물뿌리를 둘러싼 붉은 산화물이 많이 관찰되는데, 식물뿌리를 둘러싼 토양에 철산화물이 피복된 것으로 보인다(Fig. 4B). 이를 확대하여 미세조직을 관찰하면 철의 집적현상이 두드러지게 나타난다(Fig. 4C).

3.2. 토양특성 및 입도분석

토양시료의 특성을 파악하기 위해 토양의 pH, 이온전도도, 토양수의 이온농도, 토성을 측정하였다. 이 결과, 대상 시료들은 모두 pH 5.31~5.66의 산성토양으로 JD-1,2는 높은 이온전도도와 이온농도를 가지고 있다(Table 2). 토양에 함유된 이온은 JD-2에서 가장 큰

Table 2. Chemical properties and concentrations of soluble ions in the soil samples

Samples	Soil pH	Ion Conductivity (μs/cm)	Ion Concentration (ppm)							
			Cl^-	Br^-	PO_4^{3-}	Na^+	K^+	NH_4^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}
JD-0	5.66	64.5	4.73	5.70	0.22	5.84	1.91	1.19	0.75	3.15
JD-1	5.61	136.4	3.92	27.96	31.03	11.37	2.25	2.88	1.10	7.47
JD-2	5.32	202.1	2.18	60.14	47.62	12.30	2.99	2.54	2.69	15.85
JD-3	5.45	78.1	3.34	12.02	35.46	8.92	2.00	2.00	1.44	7.49
JD-4	5.42	70.6	3.62	9.36	0.50	7.50	1.82	1.76	1.77	8.15
JD-5	5.31	169.4	6.77	16.85	1.54	10.24	2.02	2.36	3.14	14.25

농집 현상을 보였는데 특히 Br^- 과 PO_4^{3-} 함량이 다른 시료에 비해 20~200배 높은 특징을 가지고 있다.

인(P)은 인간의 농경활동 등에 의해 생성되는 부영양화의 주요 원인물질로 토양에서 수용성으로 존재하거나 낮은 용해도를 가지는 광물에 흡착하는 형태를 가진다. 특히 산성토양에서는 철산화물에 흡착되는 형태를 가지기도 한다(Kim *et al.*, 2008). JD-2에서 나타나는 이온의 부화현상은 퇴적과 풍화과정에 의한 결과라기보다는 경작과 인간 활동에 의한 농집 특징이라고 판단되나 그 원인을 규명하는 데에는 더욱 심도 있는 검토가 필요할 것으로 생각된다. JD-5에서도 높은 이온 농집이 관찰되는데, 이는 표층에서 나타나는 인간 활동에 의한 오염의 결과로 판단된다.

또한 토양시료들의 입도를 분석하여 토성(soil texture) 분류도 다이어그램에 도시한 결과(Brady and Weil, 1999), 모든 시료는 미사질양토(silt loam)에 해당되지만 상부로 갈수록 사질의 함량이 높아지고 있다(Table 3, Fig. 5). 2 mm 이상의 자갈 크기에서는 주로 석영, 장석 등이 관찰되며 2~0.05 mm의 모래 크기에서는 석영, 장석 외에 백운모가 많이 관찰된다.

Table 3. Size fraction of the soil samples

Samples	weight %			
	gravel	sand	silt	clay
JD-0	1.63	23.59	65.59	9.20
JD-1	0.28	23.17	70.94	5.61
JD-2	0.98	28.06	64.16	6.80
JD-3	1.93	36.40	56.88	4.80
JD-4	2.38	40.02	52.01	5.59
JD-5	2.20	38.21	54.32	5.26

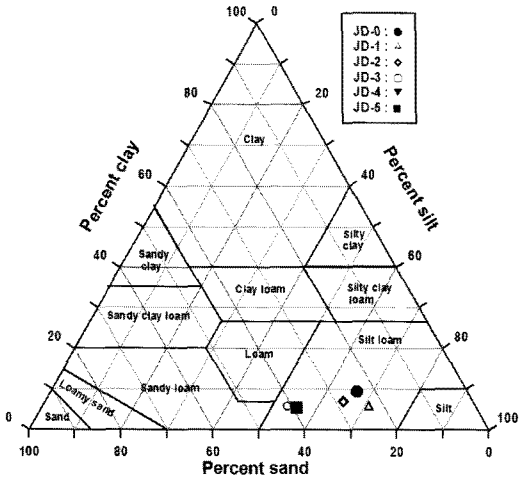

Fig. 5. Soil textures of the soil samples showing identification of silt loam and increase of sand distribution to upper soil samples.

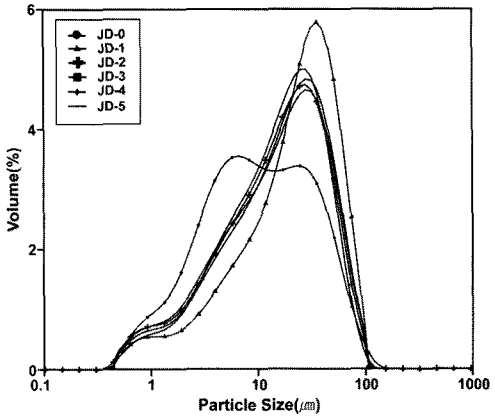

Fig. 6. Particle size distributions of the soil samples below 100 μm showing bimode (JD-0) and unimode distribution (JD-1 to 5).

100 μm 이하 입자들의 분포를 분석해 보면(Fig. 6), JD-0은 5, 25 μm 입자가 높은 분포를 갖는 쌍봉형(bimode) 형태를 보여 JD-1~5와는 분포형태가 다르다. JD-0은 분급이 불량하며 2가지 다른 기원에 의해 퇴적토가 형성되었을 것으로 보인다. 당시 금강의 하상이 완전히 매적되지 않았고 금강하구부의 조차도 약 6 m에 달하므로 바다의 영향도 직간접적으로 받았을 가능성이 있어 그 영향도 생각해 볼 수 있다(Hwang, 2008).

그러나 JD-0의 입자분포는 하성퇴적물 공급 등의 복합적인 영향을 받았을 것으로 보이며 다른 토양시료들과는 다른 기원을 가진 퇴적물로 판단된다. JD-1은 중앙값 22 μm인 조립질 미사(silt)의 분포가 높고 다소 불량한 분급을 보이고 있는 반면, JD-2~5는 중앙값(median) 15 μm와 거의 동일한 입도분포를 가진다.

3.3. 광물조성

X-선 회절분석 결과, 토양은 비점토광물로 석영, 사장석, 정장석으로 구성되어 있으며, 점토광물로 질석, 운모, 고령석을 함유하고 있고 JD-1, 5에서는 소량의 녹니석을 함유하고 있음이 확인되었다(Fig. 7).

토양시료에서 점토광물을 정밀동정하기 위해 정방위 시료 제작 후 X-선 회절 분석한 결과, 질석과 고령석의 회절선이 동정되었다(Fig. 8). 또한 상온(RT), 에틸렌글리콜 처리, 300°C, 550°C 열처리 후 각 시료의 X-선 회절선을 비교하여 질석과 고령석의 존재를 명확하게 동정하였다(Fig. 9).

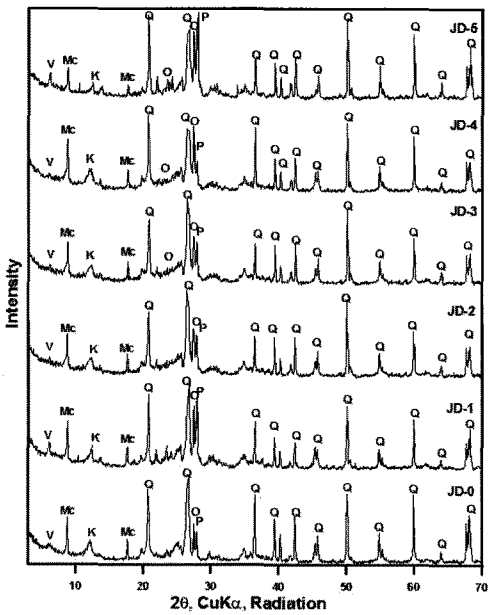

Fig. 7. X-ray diffraction patterns showing the bulk soil samples. V; vermiculite, Mc; mica, K; kaolinite, Q; quartz, O; orthoclase, P; plagioclase.

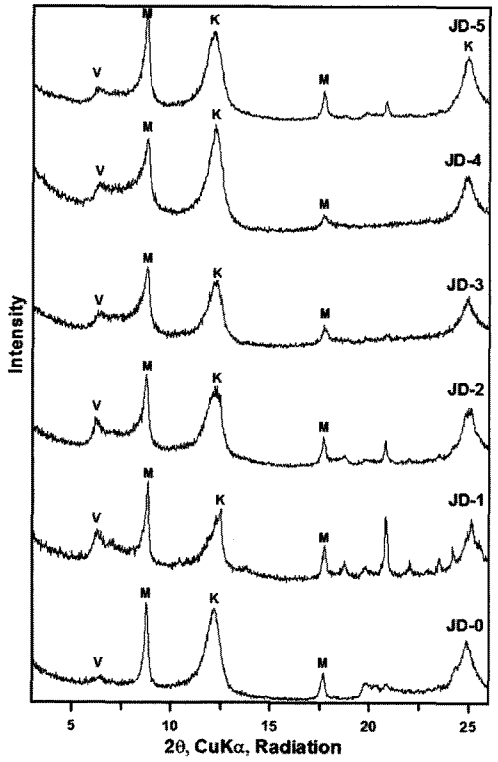

Fig. 8. X-ray diffraction patterns showing the oriented clay samples. V; vermiculite, M; mica, K; kaolinite.

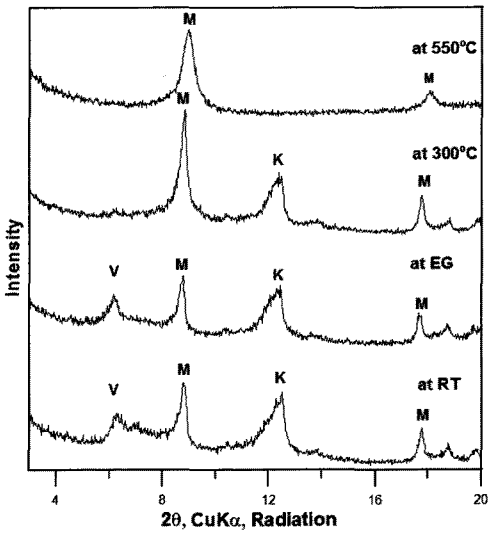

Fig. 9. X-ray diffraction patterns of JD-1 showing the oriented clay at RT, ethylene glycol treatment, 300°C and 550°C treatment. V; vermiculite, M; mica, K; kaolinite.

3.4. 지구화학적 특성

토양 층위에 따른 화학적 특성을 조사하기 위해 주성분, 미량 및 희토류 원소의 정량분석을 수행하였고, 결과는 Table 4, 5와 Fig. 10에 제시하였다. 토양시료는 69~73wt.%의 SiO_2 함량과 13~15wt.%의 Al_2O_3를 가지고 있고 그 외 알칼리 계열 원소들은 층위별로 다소 차이는 있지만 유사한 범위의 주 원소 함량을 보였다. 그러나 JD-2, 4의 P_2O_5 함량은 다른 시료에 비해 2~5배가량 높은 것으로 보아 이들 토양이 경작지로 활용되었음을 지시한다(Kim *et al.*, 2008).

호정 및 불호정 원소와 희토류 원소의 함량분포는 거의 유사하다고 볼 수 있다. 토양시료의 원소함량을 주성분, 호정 및 불호정 원소, 희토류 원소로 세분하여 화강암의 원소함량으로 표준화하여 비교한 결과(Nockolds and Allen, 1954; Govindaraju, 1989; Pearce, 1983), Fig. 10에서 모든 시료는 유사한 분포를 가지고 있었다. 다만 P, S, Sr 등은 JD-1,2에서 부화된 경향을 갖는다(Fig. 11).

한편 모든 시료의 점토광물화 정도를 조사하기 위해 일부 주원소를 A-CNK-FM 분포도에 도시하였다(Fig. 12). 이 결과, 다른 시료들과 생성기원이 다른 것으로 예측되었던 JD-0과 표층인 JD-5는 약간 분산되어 나타나나 모든 시료가 거의 동일한 범위에 도시되어 유사한 점토광물화 정도를 가지고 있는 것으로 판단된다.

Table 4. Contents (wt.%) of major elements in the soil samples

Sample	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	TiO_2	P_2O_5	LOI	Total
JD-0	73.90	13.31	4.32	0.04	0.83	0.11	0.37	2.33	0.46	0.07	4.48	100.20
JD-1	67.84	14.80	4.17	0.06	1.20	0.73	1.57	3.00	0.68	0.15	5.03	99.23
JD-2	68.62	15.25	4.08	0.06	0.97	0.43	0.93	3.61	0.59	0.29	5.40	100.20
JD-3	69.08	15.43	3.76	0.05	0.91	0.41	0.81	3.67	0.55	0.16	5.32	100.10
JD-4	70.07	15.04	4.11	0.07	0.86	0.27	0.53	3.68	0.49	0.29	4.99	100.40
JD-5	71.58	13.40	3.49	0.07	0.96	0.88	1.68	3.39	0.51	0.11	3.54	99.61

Table 5. Contents (ppm) of some minor and rare earth elements in the soil samples

Sample	Ba	Co	S	Cr	Cu	Ni	Rb	Sc	Sr	V	Zn	Zr	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Yb	Lu
JD-0	700	16	20	71	12	42	100	8.0	31	59	181	235	42.4	82	26	4.8	1.5	1.5	0.22
JD-1	700	12	100	62	18	27	130	10.3	149	72	86	244	51.7	86	35	6.3	1.3	2.5	0.36
JD-2	790	12	170	53	18	28	150	9.0	119	66	88	237	72.5	123	43	9.0	1.4	2.3	0.34
JD-3	800	10	80	54	22	30	170	9.0	112	59	126	238	69.6	117	51	8.5	1.4	2.6	0.41
JD-4	810	11	120	62	30	36	180	8.9	94	55	119	223	77.3	134	47	9.1	1.5	2.5	0.41
JD-5	770	12	60	38	12	19	130	7.4	172	57	63	179	39.4	67	29	5.1	1.0	1.9	0.33

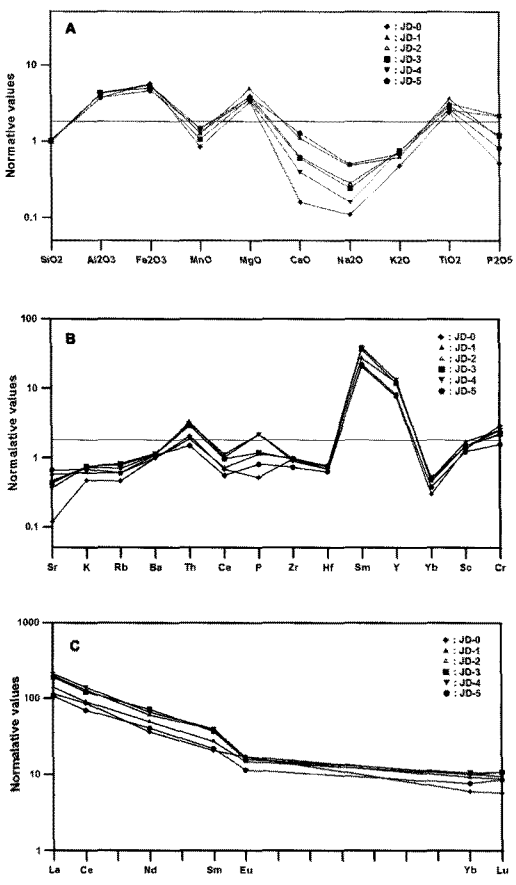

Fig. 10. Normative variation diagram showing (A) major, (B) rare earth, (C) compatible and incompatible elements of the soil samples.

4. 고 찰

4.1. 경작토양의 철산화물

부여 정동리 펑바윗골 백제시대 경작토양을 분석한 결과, 토양시료는 층위별로 다른 특징을 가지고 있다. 특히 토양에서 발견되는 붉은 철산화물의 농집현상은 당시 토양환경과 토양이용에 대한 정보를 제공한다. 철산화물의 농집현상이 일어난 토양시료는 JD-1과 2이다. 이 층위에서는 철뿐만 아니라 유기물, S, P, N 등의 농도가 다른 토양층위보다 높게 나타났다(Fig. 11).

상부층인 JD-2는 회갈색 토양에 식물뿌리가 많이 발견되는데 뿌리를 둘러싸고 붉은 철산화물이 피복되어 있다. 하부의 JD-1에서는 붉은 철산화물이 선형으로 존재하며 토양광물 사이로 철산화물이 농집되어 성장하고 있는 것이 관찰되었다. 이러한 철산화물의 농집현상은 토양환경에 따른 철의 산화상태와 변화에 기인한다.

토양형성과정에서 철(Fe)을 함유하고 있는 흑운모, 휘석, 각섬석, 감람석, 티탄철석, 자철석, 황철석 등의 광물이 풍화과정을 거치면서 철을 방출하여 2차적인 함철광물을 형성한다. 이 과정에서 산화환경에서는 철을 포함하는 점토광물과 철산화물을, 환원환경에서는 탄산화합물, 황화합물, 인산화합물을 형성하게 된다 (Cornell and Schwertmann, 2003).

철이 1차 광물에서 풍화되었을 때, 산화환경에서는 Fe^{3+}로 존재하는데, Fe^{3+}은 불용성으로 쉽게 이동하지 않는다. 반면 Fe^{2+}은 토양에서 이동성이 있어 토양 내부로 확산될 수 있지만 산화되면 불용성 산화물로 침

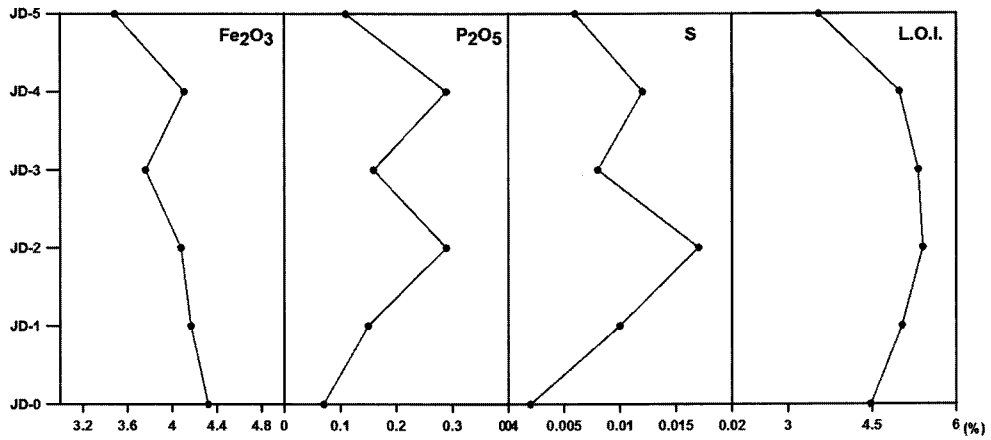

Fig. 11. Chemical profiles of the soil samples showing the enrichment of Fe_2O_3, P_2O_5, S and loss-on-ignition at the JD-2.

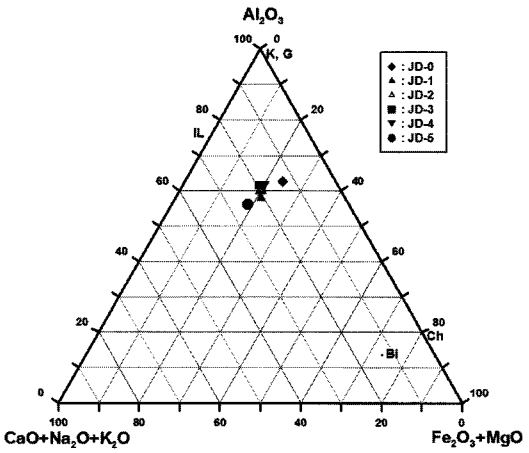

Fig. 12. Diagram showing A-CNK-FM of the soil samples showing similar distribution of major elements. K; kaolinite, G; gibbsite, Bi; biotite, Ch; chlorite, IL; illite.

전된다. 특히 무산소 상태의 토양환경은 환원상태를 유지하지만 식물뿌리를 통해 산소가 공급되면 뿌리 주변에만 산화환경이 조성되면서 철산화물이 농집된다(Begg *et al.*, 1994). 또한 토양환경에 의해 철의 산화와 환원이 교차하게 되면서 토양의 철산화물은 불균질한 분포를 갖게 되고 이는 철의 농집을 가져온다(Kogel-Knabner *et al.*, 2010; Beck and Neupert, 2009; Dionisio *et al.*, 2009; Zhang and Gong, 2003).

보통 관개농지나 범람지와 같은 토양에서는 침수가 일어나면 미생물에 의한 환원작용으로 NO_3^-, Mn^{4+}, Fe^{3+}, SO_4^{2-}가 농집된다. 환원환경에서 식물뿌리 등을 통해 산소가 공급되면 일부 철과 망간은 산화되면서 침전된다. 따라서 경작토양의 전체 철과 유기물 함량은 비경작토양에 비해 높다. 이 토양의 변화는 인간에 의한 풍화(anthropogenic alteration)로서, 경작토양 특히 관개농업을 하거나 범람에 의해 침수된 경작지에서는 나타나는 특징이다(Kogel-Knabner *et al.*, 2010; Beck and Neupert, 2009).

부여 정동리 꿩바윗골 지역은 금강변의 하성퇴적물로 형성된 지형으로, 토성은 미사질 양토로 나타났다. 상부로 갈수록 사질입자 비중이 높아지고 조립질 입자 비중이 높다. 꿩바윗골 지역은 금강의 지형면 폭이 넓고 하상비고도 커서 조립질 입자가 넓게 퇴적되어 일찍부터 자연제방이 형성되고 인간활동에 유리하고 안정된 공간이었던 것으로 보인다.

또한 20세기 초 부여 정동리 일대의 토지이용도를 보면 자연제방은 밭으로, 배후습지 및 지류범람원은 논으로 이용되었다(Hwang, 2008). 꿩바윗골은 배후습지와 인접한 자연제방 퇴적층으로 금강의 하성퇴적물에 의해 형성되고 금강의 잦은 범람에 영향을 받았을 것으로 보인다. 또한 침수와 자연 배수가 반복되면서 토양환경은 변화되었을 것이고 이러한 토양환경의 잦은 변화는 토양 내 철산화물의 불균질한 분포와 농집을 가져왔을 것으로 판단된다.

특히 상부층인 JD-2는 다른 층위에 비해 토양색이 회색에 가깝고 식물뿌리를 따라 붉은 철산화물이 형성되고 피복된 것으로 볼 때, 침수된 경작토양으로서 환원환경을 유지하다가 식물뿌리에 의해 공급되는 산소에 의해 철산화물이 농집 및 피복된 것으로 추정된다. 또한 다른 토양층에 비해 유기물, PO_4^{3-}, S의 농집현상이 나타나 인간활동에 의해 토양층의 변화가 발생한 것으로 보인다.

그 하부토양은 상부에 비해 자갈, 모래의 비율은 낮고 미사의 비율이 높아 다른 시료들과는 구분되는 입도분포를 갖는다. 식물뿌리는 거의 발견되지 않고 갈색에 가까운 토양색을 띠고 있으며 선형의 붉은 철산화물이 발견되는 것이 특징이다. 따라서 직접 경작토양으로 사용되기 보다는 경작토양의 하부층으로서 상부 토양으로부터 이온의 용탈이 진행되었을 것으로 해석된다.

4.2. 정동리 출토 전과의 관계

부여 정동리는 백제시대부터 대규모 가마터가 조성되어 기와와 전의 생산이 활발했던 것으로 추정되고 있다(BNM, 2006). 전체적인 발굴조사가 실시되지는 않았지만 지표조사 결과, 연화문전과 명문전 이외에도 암키와, 수키와, 토기 등이 수습되기도 했다. 특히 정동리 가마터 부근에서 수습된 연화문전과 명문전은 공주 무령왕릉과 송산리 6호분의 전과 유사한 형태와 문양을 가지고 있어 무령왕릉 전의 제작지로 추정되기도 하였다(BNM, 2006; Kim, 2000). 이러한 추정을 자연과학적인 방법으로 검증하기 위해 필자들은 무령왕릉을 비롯한 송산리 고분군에서 출토된 전과 정동리에서 발견된 전과 토양에 대하여 광물학적 및 지구화학적으로 연구한 바 있다(Lee *et al.*, 2007a; Lee *et al.*, 2007b).

이 결과, 무령왕릉, 송산리 고분군, 정동리 출토 전과 정동리 토양은 유사한 토양광물학적 특성을 가지고 있고 지구화학적 진화경향도 유사하였다. 제게르식(Seger formula)에 근거하여 주 원소를 알칼리 화합물과 산성화합물로 나누고 그 분포를 도시해 보면(Fig. 13), 무령왕릉 전, 일부 송산리 고분군 출토 전, 정동리 토양 일부가 매우 유사한 범위의 원소조성을 가지고 있음을 확인할 수 있다. 다만 전의 편광현미경 관찰에서 0.5 이상의 입자가 거의 없는 것으로 보아 토양에서 거정질 입자는 거의 제거되었을 가능성이 크다. 주

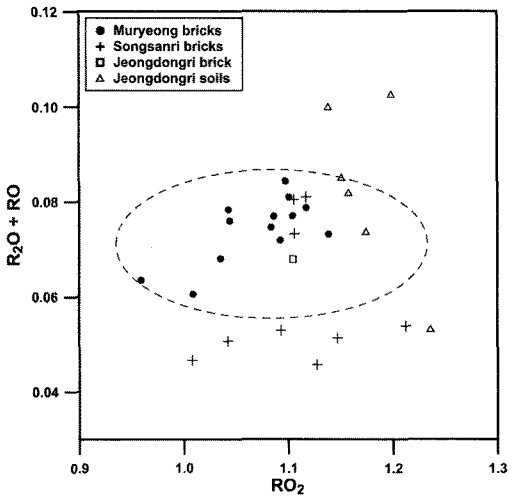

Fig. 13. Diagram showing bricks from the Songsanri Tombs in Gongju and soils from the Jeongdongri area.

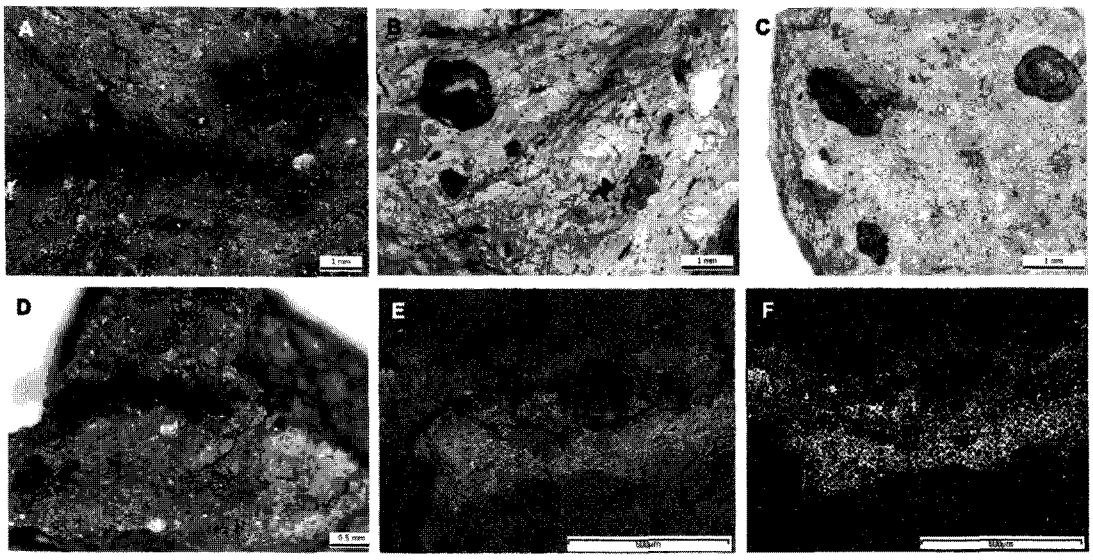

Fig. 14. Internal microtexture of bricks from the Songsanri Tombs and the Jeongdongri area showing (A) 510-11, (B) 510-45, (C) JDB-1 (brick found in Jeongdongri site), (D) Internal microtexture, (E) Backscattering electron image (BEI), (F) Fe mapping image by SEM-EDS for 510-11 sample.

원소 분석결과에서도 전에서는 SiO_2 등과 같이 거정질 입자를 구성하는 주요 원소들의 함량이 낮게 나타났다. 따라서 이 토양은 간단한 수비과정을 거쳐 전의 재료로 사용되었을 것으로 추정된다.

일부 전의 내부조직에서는 붉은 줄무늬형태가 발견되기도 했는데, SEM-EDS 분석결과 철산화물로 확인되었다(Fig. 14). 이들은 토양 내 포함되어 있던 철산화물 덩어리로서 전의 제작과정을 거치면서 일부는 제거되고 남은 잔존물일 것으로 판단된다. 전통적인 토기제작과정에서도 태토준비를 위해 토양을 섞고 두드리면서 배합하면 철산화물의 일부는 분산되나 상당부분 토기에 남아있는 경우가 발견되기도 한다(Dionisio *et al.,* 2009).

기와의 경우에도, 농사가 끝난 논토양을 채취하여 흙괭이질과 흙이기기의 과정을 통해 이물질을 제거하고 토양이 고루 배합되게 하는데 이를 발로 밟고 손으로 치대면서 찰지고 부드러운 흙을 만든다(NRICH, 1996). 이 과정에서 토양 내 철산화물 덩어리들은 부서지고 흩어져 본래의 형태를 가지지 못하게 된다. 그러나 그 형태가 비교적 잘 남아있는 경우가 발견되는 등 전이나 기와, 토기에서 철산화물의 덩어리를 확인할 수 있다.

Fig. 14에서 확인된 전의 철산화물 덩어리는 토양에 남아 있는 철산화물의 흔적으로 판단되며 기존 연구에서 확인되었던 전의 산지추정에 또 다른 근거가 될 것으로 해석된다. 따라서 정동리 펑바윗골 경작토양 JD-1과 2는 범람에 의한 침수와 배수가 반복된 토양의 특징을 가지고 있으며 정동리 가마터에서 생산된 와전의 재료로 활용되었을 가능성이 매우 높을 것으로 해석된다.

5. 결 론

이 연구에서는 백제시대 경작 유적이 발견된 부여 정동리 펑바윗골 유적을 대상으로 경작토양의 특성을 검토하고 이 토양이 고대 와전류 태토산지로서의 가능성을 검토하였다. 정동리 펑바윗골 유적의 연구대상 토양시료들은 모두 미사질 양토로 상부로 갈수록 거정질 입자가 증가한다. 가장 하부층을 제외하고는 모두 유사한 기원의 토양입도를 가지고 있다.

모든 토양시료는 pH 5.31~5.66으로 산성토양의 특성을 가지고 있고 JD-2에서 유기물, P, S 등의 집적현상이 관찰되었다. 주성분, 미량 및 희토류 원소의 분포경향이 매우 유사한 특성을 보이며 석영, 사장석, 정장석, 질석, 운모, 고령석으로 구성되어 모두 동일한 광물조성을 가지고 있다.

이 토양들은 금강에 의한 하천 퇴적토로 지형적으로는 조립질 입자가 넓게 퇴적된 자연제방 퇴적토이다. 특히 하위 층준에서 관찰되는 붉은 철산화물의 농집현상은 경작지가 금강범람으로 침수되었다가 다시 자연배수에 의해 경작지로 재활용되었던 결과로 해석된다. 따라서 이 층준은 침수로 인해 환원환경을 유지하다가 식물생장으로 공급된 산소를 따라 뿌리주변에 철산화물이 피복된 것으로 보인다. 이후 강에 의한 범람과 배수로 산화, 환원환경이 반복되면서 토양 내 철산화물의 농집을 가져왔던 것으로 판단된다.

이는 자연현상과 인간의 경작활동에 의한 풍화양상으로 볼 수 있다. 이 지역 토양은 무령왕릉과 송산리 고분군에서 출토된 전의 태토 산지로 추론된다. 특히 일부 전에서 발견되는 철산화물의 농집현상은 전의 재료로서 경작토양이 사용되었을 가능성을 제시하는 것으로 해석된다.

참고문헌

Beck, M. and Neupert, M. (2009) Identifying pottery clay from rice fields: an example from southern Luzon, the Philippines. Journal of Archaeological Science, v.36, p.843-849.

Begg, C., Kirk, G., Mackenzie, A. and Neue, H. (1994) Root-induced iron oxidation and pH changes in the lowland rice rhizosphere. New Phytol., v.128, p.469-477.

Brady, C. and Weil, R. (1999) The Nature and Properties of soils. 12th Ed., Prentice Hall, p.125-126.

Buyeo National Museum(BNM) (2006) Artifacts and workshops in Baekje. p.146.

Chungcheongnamdo Office of Education(COE) (1994) Chungnam; Geology and Minerals, p.265-269.

Cornell, R. and Schwertmann, U. (2003) The Iron Oxides. 2nd Ed., Wiley-VCH GmbH & Co. KGaA, p.433-439.

Dionisio, A., Brage, M. and Waerenborgh, J. (2009) Clay minerals and iron oxides-oxyhydroxides as fingerprints of firing effects in a limestone monument. Applied Clay Science, v.42, p.629-638.

Govindaraju K. (1989) Compliation of working values and samples description for 272 geostandards. Geostandards Newsletter, v.13, p.1-113.

Hwang, S.I. (2008) Geographical evolution of Baekje Kun-Gil site and depositional environments of floodplains. Jeongdong-ri Oyatgol·Kwongbawigol Site, Buyeo, Chungcheong Cultural Properties Research Institute, p.207-238.

Jackson, M. (1969) Soil Chemical Analysis -Advanced course. Department of Soils, University of Wisconsin.

Kim, J.G., Chon, C. and Lee, J.S. (2008) Change of chemical properties and nutrient dynamic in pore water of upland soil during flooding. Economic and Environ-

mental Geology, v.41, p.327-334.
Kim, S.G. (2000) Ancient Roof Tiles. Daewon-sa, p.103-105.
Kogel-Knabner, I., Amelung, W., Cao, Z., Fiedler, S., Frenzel, P., Jahn, R., Kalbitz, K., Kolbl, A. and Schloter, M. (2010) Biogeochemistry of paddy soils. Geoderma, v.157, p.1-14.
Lee, C.H., Jang, S., Kim, B.S., Han, E.H. and Ha, E.Y. (2007a) Archaeometric characteristics of bricks from King Muryeong's Tomb. Research of Artifacts from King Muryeong's Tomb III, Gongju National Museum, p.6-77.
Lee, C.H., Kim, M.J., Song, G.W., Jang, S. and Kim, J.Y. (2007b) Age determination of bricks related to Muryeong royal tomb of the Baekje Kingdom. Research of Artifacts from King Muryeong's Tomb III, Gongju National Museum, p.80-101.
Lee, P.S., Lee, I.H. and Kim, G.H. (2008) Jeongdong-ri OyatgolKwongbawigol Site, Buyeo. Chungcheong Cultural Properties Research Institute.
Moon, H.S. (1995) Clay Minerals. Minumsa, p.27-46.
National Research Institute of Cultural Heritage (NRICH) (1996) Important intangible cultural heritage No. 91, Je Wa Jang (Master Craftsman of Roof-tile). p.85-95.
Nockolds, S. and Allen, R. (1954) Average chemical compositions of some igneous rocks. Geological Society of American Bulletin, v.65, p.1007-1032.
Park, S.B., Lee, S.J., Tsuchida J. and Jung, W.J. (2004a) Buyeo Gubong·Nohwari Site A, Paekche Research Institute, Chungnam National University.
Park, S.B., Lee, S.J. and Jung W.J. (2004b) Daejeon Noeundong Site, Paekche Research Institute, Chungnam National University.
Park, S.B. and Lee, S.J. (2004c) Buyeo Hapsongri Site, Paekche Research Institute, Chungnam National University.
Pearce, J. (1983) Role of sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margines. In Hawkesworth, C. and Norry, M. (Eds), Continental basalts and mantle xenolith, Shiva, p.230-249.
White, G. and Dixon, J. (2003) Soil Mineralogy Laboratory Manual. 9th Ed., Department of Crop and Soil Sciences, Texas A&M University.
Zhang, G. and Gong, Z. (2003) Pedogenic evolution of paddy soils in different soil landscapes. Geoderma, v.115, p.15-29.

2010년 11월 3일 원고접수, 2010년 12월 17일 게재승인