고대기와의 자연과학적 분석 연구

경기도 하남시 천왕사지출토기와를 중심으로

홍 종 욱 (국립문화재연구소 보존과학연구실)

국문 요약

20세기에 들어와 컴퓨터의 발달로 문화재를 복원하는데 있어 다양한 자연과학적 방법이 시도되고 있다.

문화재에 적용되는 통계학을 비롯한 자연과학적인 방법을 통해 문화재의 재질에 대한 주성분 및 미량성분을 분석하여 산지추정을 할 수 있고, 더 나아가 고대의 교역 및 교류관계를 규명하고, 생산지와 소비지 사이의 정치·경제·문화관계 등 다양한 정보를 밝혀내고 있어 그 필요성이 더욱 요구되고 있다.

본 연구는 흡수율 및 광물결정분석, 편광현미경분석, 통계분석 등의 자연과학적인 방법을 이용하여 경기도 하남시 천왕사지 유적내 기와 가마로 추정되는 소성유구의 성격과 유구 및 주변 건물지에서 출토된 기와들에 대해 상호관계를 밝히고자 시도되었으며, 연구결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

경질 기와 편들을 제외한 연질 기와 편들은 다른 기와에서 볼 수 있는 흡수율(10%이상)과 비슷한 수치를 보였으며, 흡수율이 낮은 일부시료에서는 Mullite, Tridymite, Cristobalite와 같은 고온 결정상 등이 존재하는 것으로 보아 다른 기와편에 비해 소성온도가 높았음을 알 수 있었다. 또한 미량성분을 통한 통계분석결과 소성유구와 천왕사지 내에서 출토된 기와는 한 군으로 분류된 것으로 보아, 밀접한 관련성을 가지고 있음을 알 수 있었고, 천왕사 축조시 원거리에서 기와를 공급받은 것이 아닌 사지 내에 가마를 설치한 후 공급하였음을 알 수 있었다.

주제어 :

1. 컴퓨터의 발달로 문화재를 복원하는데 있어 다양성
2. 소성유구의 성격과 주변 건물지에서 출토된 기와들에 대해 상호 관계
3. 연질 기와 편들은 다른 기와에서 볼 수 있는 흡수율(10%이상)과 비슷한 수치를 보였으며
4. 고온 결정상 등이 존재
5. 사지 내에 가마를 설치한 후 공급하였음

Ⅰ. 서 론

20세기에 들어와 컴퓨터의 발달로 문화재를 복원하는데 있어 다양한 자연과학적 방법이 시도되고 있다.

문화재에 적용되는 통계학을 비롯한 자연과학적인 방법을 통해 문화재의 재질에 대한 주성분 및 미량성분을 분석하여 산지추정을 할 수 있고, 더 나아가 고대의 교역 및 교류관계를 규명하고 생산지와 소비지 사이의 정치·경제·문화관계 등 다양한 정보를 밝혀내고 있어 그 필요성이 더욱 요구되고 있다.

아직까지는 고고학에서 유적의 편년 및 성격 규명을 위해서는 유물을 통한 형식분류에 의존하고 있다. 그러나, 단순히 유물의 형식적 검토에 머무는 것이 아니라 유물이 내포하고 있는 많은 정보를 수집하기 위해서는 다양한 방법이 시도되어야 할 것이다. 이러한 측면에서 자연과학적 연구는 기존의 형식분류에 의한 편년연구에서 벗어나 유물이 내포하고 있는 정보를 정확하게 파악하고자 하는 시도 가운데 하나가 될 것이다.

특히 기와에 대한 연구는 주로 형태, 태토 및 문양 등의 양식학적인 분류를 통해 발생시기, 편년 및 변천과정 등의 연구가 진행되어 왔으며[1], 이 또한 형식학적 검토라는 범주를 벗어나기 어려운 것이 사실이다. 따라서, 최근에는 형식학적측면에서 벗어나 자연과학적인 접근을 통한 산지추정, 연대측정 및 제작기술 연구가 활발하게 진행되고 있다[2].

그 일례로 우리나라에서 기와에 대한 자연과학적 분석은 1972년 국립중앙공업연구소 박용완이 신라기와 4점을 비롯한 기와 17점에 대하여 습식분석에 의한 정량분석과 X선 회절분석을 통한 광물조성 및 물리시험으로 시대별 기와의 물리 화학적 특성을 비교한 것이 최초이다. 근래에는 1996년 광주 운남동 유적에서 출토된 토기·와편과 2000년 전남 지방 출토 기와에 대하여 X선 회절분석을 통한 소성온도 추정 및 주성분, 미량성분을 분석하였으며, 2001년에는 경기 북부지역 성곽출토 고구려 평기와에 대하여 중성자방사화분석법으로 산지를 분류하고 X선 회절분석법으로 소성온도를 추정한 예가 있다[3-6].

본 연구에서는 그러한 노력의 일환으로 경기도 하남시 천왕사지 유적 내 기와 가마로 추정되는 소성유구의 성격과 유구 및 주변 건물지에서 출토된 기와들의 상관관계를 밝히기 위한 자연과학적인 접근을 시도하였다.

Ⅱ. 연구대상 및 시료

1. 연구대상

천왕사지 유적은 경기도 하남시 하사창동 351번지 일원에 위치한 4000여평의 대형 사찰터로 1995년 백제문화연구회의 조사에 의해 '天王'이라는 銘文瓦片이 확인된 유적으로 정밀학술발굴조사는 한국문화재보호재단에서 2000년 11월 2001년 12월까지 2차에 걸쳐 사지의 성격규명 및 정비·보존을 위한 학술조사가 이루어진 곳이다.

조사결과 목탑지, 건물지, 담장지, 배수시설, 소성유구, 기단시설, 석렬시설 등이 확인되어 일부 지표유물과 기록만을 바탕으로 근거하던 천왕사의 규모와 사역범위에 대해 어느 정도 밝히게 되었으나 이번 발굴은 일부지역에 대한 시굴의 형태이기 때문에 건립연대를 단정하기 어려우며 추후 전면적인 발굴을 실시하다면 백제시대의 유물과 유적들을 확인될 수 있을 것으로 기대되고 있다.

특히 조사결과 확인된 소성유구는 노출상태만으로 그 성격을 파악하기는 어려우나 주변에서 다량의 유리질화된 벽체편이나 고온 소성으로 변형된 기와편들이 다량 수습되어 당시의 천왕사의 수요물품을 제작하던 기와 생산 관련시설로 추정되며, 이는 공방시설 등의 위치파악에 있어서도 매우 중요한 단서가 될 것으로 파악된다[7]. 따라서 추정 소성유구의 정확한 성격을 밝힌다면 천왕사의 규모와 위치에 대한 보다 명확한 설명이 가능할 것이다.

<사진 1> 하남시 고골의 전경

<사진 2> 천왕사 명문와편

2. 연구대상시료

분석대상은 출토된 시료 중 분석을 통해 전체 시료의 대표성을 나타낼 수 있고, 추정 소성유구의 성격을 규명하기 위하여 소성유구에서 출토된 기와 5점, 건물지 내에서 출토된 기와 25점, 슬랙 및 소토덩어리 3점, 총 33점을 대상으로 하여 분석을 실시하였으며, 시료 목록은 표 1과 같다.

3. 분석방법

분석대상 시료는 증류수에 담가 씻어 주었으며 110℃의 온도에서 완전 건조하였다. 완전 건조한 시료들은 텅스텐 카바이드 송곳으로 표면의 오염물을 제거한 후 내부의 조각을 수습하여 모르타르로 분말화하였다. X선 회절 분석으로 각 출토지별 기와의 광물 결정을 알아보았고, 물리적 측정 방법인 흡수율을 측정하여 연질과 경질 기와의 흡수율 차이 및 광물 결정에 따른 흡수율의 상관관계를 살펴보았다. 이러한 결정은 기와편의 소성온도 추정에도 이용하였다.

<표 1> 시 료 목 록

시료번호	시 료 명	시 대	출토현황	비 고
1	당초문 암막새	10세기		
2	귀목문 암막새	10세기		
3	연화문 수막새	10세기		
4	연화문 수막새	10세기		
5	우차명 암기와	10세기		
6	관명문 암기와	10세기		
7	전	10세기		
8	소토덩이	10세기	소토덩이	
9	소토덩이	10세기	소토덩이	
10	슬랙	10세기		
11	무문 암기와	10세기	소성로	
12	무문 암기와	10세기		
13	무문 암기와	10세기		
14	무문 암기와	10세기		
15	곡선문 암기와	10세기	소성로	
16	선문 암기와	10세기	소성로	
17	격자문 수기와	10세기		
18	승문 암기와	10세기		
19	태선문 암기와	10세기	소토덩이	
20	승문+격자암기와	10세기		
21	무문 수기와	10세기	소성로	
22	승문 암기와	10세기		
23	선문 암기와	10세기		
24	무문 수기와	10세기		
25	무문 수기와	10세기	소성로	
26	양각선 암기와	10세기		
27	태선 암기와	10세기		
28	태선 암기와	10세기		
29	가는어골문 암기와	10세기		
30	테산어골문 암기와	10세기		
31	방곽집선문 암기와	10세기		
32	승문 수기와	10세기		
33	복합차륜문 암기와			

(1) 흡수율 측정

토기는 표면과 내부에 작은 공극들이 존재하며, 이들 공극은 토기원료의 특성 및 소성의 특성을 부분적으로 나타내며, 이러한 특성은 토기의 제작환경과 제작특성을 간접적으로 반영하는 것이라 할 수 있다. 그러므로 이러한 공극의 정도를 간접적으로 측정하는 방법이 흡수율이며, 이 흡수율의 측정은 먼저 각 기와편을 80 100℃에서 2일간 완전 건조시킨 후 무게를 달아서 건조한 무게 W_1을 구하고, 이것을 물 속에서 2일간 침적시킨 후 각 기와편의 무게 W_2를 재어서 다음 식으로 흡수율을 구하였다.

$$흡수율(\%) = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100$$

흡수율은 측정오차를 줄이기 위해 3회 반복 실험하여 평균값을 구하였다.

(2) 광물 결정 분석

분말화한 시료를 유리판에 고착한 후 미소부 X선 회절분석기(Micro-area X-ray diffraction system : MXRD, MAC Science, MXP18VA, Japan)로 각 기와의 광물결정들을 알아보았으며, 이때 Target은 Cu를 이용하였다. 분석 조건은 30kV, 50mA이었고, scanning speed는 4°/min이었다. 계측 후 분석데이타는 피이크 매칭(peak matching) 프로그램을 이용하여 각 피이크를 동정하였다.

(3) 중성자방사화분석

분말 시료 약 90 110㎎을 칭량한 다음 폴리에칠렌 바이알에 넣어 밀봉하였다. 방사화작업은 대전 한국원자력연구소 하나로(Maximun thermal neutron flux of HANARO. 5×10^{14}n/㎠ · sec)의 기송관 및 회전식 시료대를 이용하였고, 시료는 Power 20MW (1.7×10^{13}n/㎠ · sec)의 중성자속에서 표준시료(SRM)와 함께 1시간 조사되었다.

감마선계측은 HPGe Semiconductor Detector가 연결된 8,000채널 파고분석기(EG&G ORTEC USA)로 1,000, 2,000, 3,000초로 반감기 시간을 조절하여 계측하였다. 각 시료를 방사화시킨 후 원자력연구소에서 본 연구소까지 시료를 가지고 오는데 약 1주일정도 소요되므로, Na(15시간), K(12시간)와 같이 반감기가 짧은 원소들은 계측하지 못하였다. 그리고 중성자 간섭으로 인해 함께 나타나는 피이크들을 제외하고, 그 중에서 검출 효율이 좋으며, Peak 면적이 높게 나타나는 15개의 방사성 핵종(Ta, Nd, Sm, Eu, Ce, Lu, Cr, Yb, Hf, La, Ba, Cs, Sc, Rb, Co)을 선정하였다. 각 시료의 함량은 표준시료를 이용한 단일 비교체법으로 계산하였다.

(4) 편광현미경 관찰

편광현미경 관찰은 먼저 시료의 일부를 에폭시수지에 마운팅한 후 연마지 #200, #500, #800, #1200, #1500, #2000, #2400, #4000을 사용하여 순서대로 양호한 관찰면이 나올 때까지 연마하고, diamond cutter를 이용하여 연마면으로부터 약 3mm 정도의 두께로 절단한 다음 연마면을 에폭시수지를 이용하여 슬라이드글라스면에 접착시킨다. 24시간이 경과한 다음 접착된 시료를 다시 연마지 #200, #500, #800, #1200, #1500, #2000, #2400, #4000을 사용하여 0.03mm의 두께가 될 때까지 천천히 연마한 후 편광현미경(Polarization Microscope, Carl Zeiss, Axioplan 2/Progress 3012, Germany)상에서 시료를 관찰하였다.

III. 분석결과 및 고찰

1. 분석결과

(1) 흡수율

기와 및 소토덩이, 슬랙 등의 흡수율을 측정한 후 그 결과 값을 그림 1과 표 2에 나타내었다.

그림 1은 기와의 시료별 흡수율에 대한 평균값을 나타낸 것이다. 가마벽에 부착된 것으로 추정되는 소토덩이 시료 8, 9, 19의 평균흡수율은 15.7%, 소성로에서 출토된 시료 11, 15,

<그림 1> 흡수율 비교표

<표 2> 기와 흡수율 측정 결과

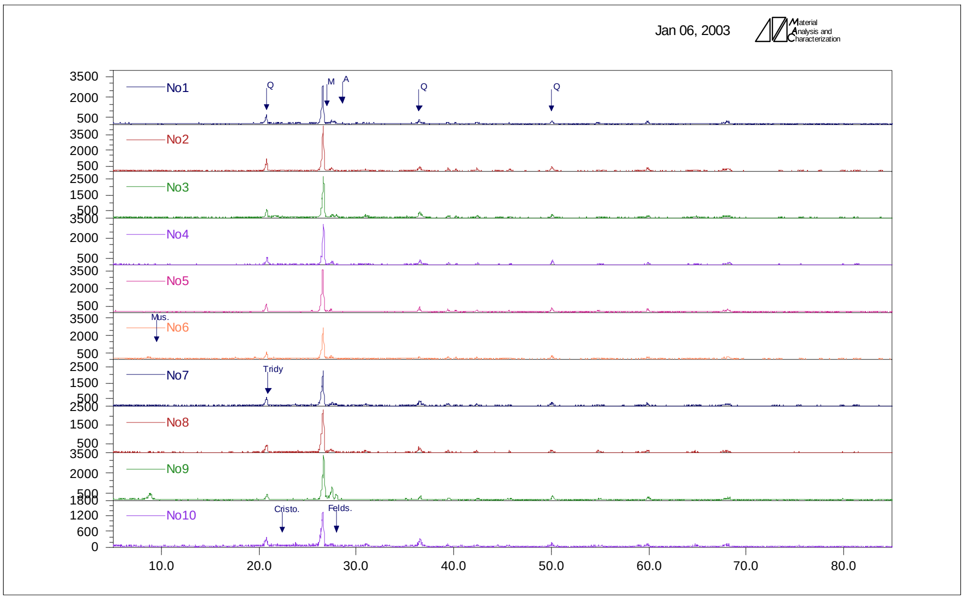
시료	1차 측정			2차 측정			3차 측정			합계(%)
	건조	흡수	흡수율	건조	흡수	흡수율	건조	흡수	흡수율	평균흡수율
1	168.61	193.59	12.90	168.38	195.00	13.65	168.54	194.25	13.24	13.26
2	83.00	97.61	14.97	82.90	98.90	16.18	82.97	98.75	15.98	15.71
3	13.77	15.26	9.76	13.75	15.51	11.35	13.85	15.86	12.67	11.26
4	20.23	23.60	14.28	20.20	23.98	15.76	20.56	23.56	12.73	14.26
5	22.20	25.63	13.38	20.13	25.95	22.43	22.34	25.63	12.84	16.22
6	19.47	22.73	14.34	19.35	22.98	15.80	19.18	22.55	14.94	15.03
7	28.08	30.69	8.50	28.01	31.13	10.02	28.15	31.23	9.86	9.46
8	120.59	144.76	16.70	120.36	146.40	17.79	120.76	146.35	17.49	17.32
9	34.77	41.76	16.74	34.53	42.45	18.66	34.25	42.25	18.93	18.11
10	48.97	49.54	1.15	48.97	49.79	1.65	48.97	49.52	1.11	1.30
11	48.96	56.15	12.80	48.90	56.77	13.86	48.02	56.87	15.56	14.08
12	24.45	27.37	10.67	24.18	27.67	12.61	24.09	27.63	12.81	12.03
13	40.64	47.27	14.03	40.60	47.92	15.28	40.62	47.25	14.03	14.44
14	173.33	179.26	3.31	173.26	180.77	4.15	173.52	180.01	3.61	3.69
15	19.36	21.76	11.03	19.11	21.94	12.90	19.12	21.12	9.47	11.13
16	20.59	21.02	2.05	20.58	21.22	3.02	20.23	21.20	4.58	3.21
17	26.01	29.20	10.92	25.97	30.21	14.04	25.68	30.21	15.00	13.32
18	17.50	19.86	11.88	17.13	19.67	12.91	17.15	19.55	12.28	12.36
19	51.08	57.64	11.38	50.34	57.64	12.66	50.89	57.14	10.94	11.66
20	100.86	111.63	9.65	100.68	112.67	10.64	100.56	112.20	10.37	10.22
21	17.01	19.48	12.68	16.87	19.66	14.19	16.88	19.53	13.57	13.48
22	30.85	36.46	15.39	30.80	36.92	16.58	30.68	36.85	16.74	16.24
23	66.82	79.10	15.52	66.71	79.79	16.39	66.87	79.78	16.18	16.03
24	12.94	14.81	12.63	12.85	14.89	13.70	12.80	14.56	12.09	12.80
25	50.19	59.33	15.41	50.11	59.86	16.29	50.12	58.99	15.04	15.58
26	29.86	35.11	14.95	29.83	35.54	16.07	29.59	35.29	16.15	15.72
27	86.20	98.90	12.84	86.13	99.81	13.71	86.12	99.56	13.50	13.35
28	47.32	50.25	5.83	47.28	52.10	9.25	47.65	52.12	8.58	7.89
29	89.04	99.24	10.28	88.96	100.37	11.37	89.01	100.12	11.10	10.91
30	64.66	74.65	13.38	64.62	75.75	14.69	64.64	75.45	14.33	14.13
31	32.85	38.01	13.58	32.75	38.55	15.05	32.90	38.68	14.94	14.52
32	39.23	43.27	9.34	39.21	43.77	10.42	39.35	43.55	9.64	9.80
33	12.31	14.70	16.26	12.30	14.99	17.95	12.32	14.69	16.13	16.78

21, 25는 13.6%이며, 시료 16은 3.2%이었다. 그 외 유적지출토 기와의 경우 시료 14를 제외한 평균 흡수율은 12.9%로 측정되었다. 가장 적은 것은 슬랙(No.10)으로 1.30%로 기록되었다. 시료 10과 더불어 흡수율이 다른 기와에 비하여 매우 작게 나온 시료 14, 16은 경질기와임을 의미한다.

(2) 광물결정

기와를 구성하고 있는 결정구조의 X-선회절분석에서 나타나는 특성 피크(시료 1 10)는 그림 2와 같은 특징을 나타내며, 시료의 광물 조성은 표 3과 같이 동정되었다.

광물 조성을 동정한 결과 시료 No. 7, 9, 10, 14, 16, 19, 28, 32는 주성분인 석영이 검출되었으며, 점토질 광물은 거의 동정되지 않았고, 그 외 시료에서 점토 광물과 Albite, Microcline 등과 같은 장석이 검출되었다. 점토 광물이 분석되지 않은 기와편들은 점토광물이 분석된 기와편들에 비하여 높은 온도에서 소성하였음을 의미한다. 특히 시료 No. 7, 10, 14, 16은 기와를 고온 소성하였을 때 나타나는 Tridymite, Cristobalite, Mullite 등이 검출되는 것으로 보아 다른 기와에 비하여 높은 온도에서 소성하였으며 또한 경질기와임을 알 수 있다. 특히 시료 No. 10인 슬랙에서는 석영(Quartz)을 고온 소성하였을 때 나타나는 Cristobalite가 분석되는 것으로 보아 이들 중 가장 높은 온도에서 소성된 것임을 알 수 있었다.



<그림 2> X-선회절분석에 의한 결정구조 피이크(No.1 ~ No.10)
(Q: Quartz, M: Microcline, A: Albite, Mus.: Muscovite, Tridy: Tridymite, Cristo.: Cristobalite, Felds.: Feldspar)

<표 3> 광물조성

번호	유물명	Quartz (SiO_2)	Tridymite (SiO_2)	Cristobalite (SiO_2)	Mullite ($Al6Si_{12}O_{13}$)	Feldspar ((Na·K)$AlSi_3O_8$)		Raw Material	etc.
						Albite	Microcline		
1	당초문 암막새	○				○	○		
2	귀목문 암막새	○					○		
3	연화문 수막새	○					○		
4	연화문 수막새	○				○	○		
5	우차명 암기와	○				○	○		
6	관명문 암기와	○					○	Muscovite	
7	전	○	○				○		
8	소토덩이	○					○	Muscovite	소토덩이
9	소토덩이	○					○		소토덩이
10	슬랙	○		○				Feldspar	슬랙
11	무문 암기와	○				○	○		소성로
12	무문 암기와	○				○		Orthoclase	
13	무문 암기와	○				○	○		
14	무문 암기와	○	○					Anorthite	
15	곡선문 암기와	○						Anorthite	소성로
16	선문 암기와	○			○	○	○		소성로
17	격자문 수키와	○				○	○		
18	승문 암기와	○				○		Sanidine, Muscovite	
19	태선문 암기와	○				○	○	Muscovite	소토덩이
20	승문+격자 암기와	○					○	Anorthite	
21	무문 수키와	○				○		Montmorillonite	소성로
22	승문 암기와	○						Illite, Orthoclase	
23	선문 암기와	○				○		Orthoclase	
24	무문 수키와	○					○	Muscovite	
25	무문 수키와	○					○	Muscovite	소성로
26	양각선문 암기와	○					○	Illite	
27	태선 암기와	○					○	Labradorite	
28	태선 암기와	○						Montmorillonite, Labradorite	
29	가는어골문 암기와	○					○	Labradorite	
30	태선어골문 암기와	○					○	Labradorite	
31	방곽집선문 암기와	○				○	○	Illite	
32	승문 수키와	○				○	○		
33	복합차륜문 암기와	○					○	Anorthoclase	

소토덩이 시료인 No. 8, 9, 19에서는 점토 광물인 Muscovite와 Microcline, Albite 등이 검출되었고, 소성유구에서 출토된 시료인 No. 11, 15의 경우는 Albite, Microcline, Anorthite와 같은 장석광물만이 검출되었으며, 시료 21, 25는 Albite, Microcline 등 장석광물과, Montmorillonite, Muscovite와 같은 점토광물이 함께 검출되었다. 특히 시료 16은 Albite, Microcline 그리고 장석광물에 유리상인 Mullite 등이 함께 검출되는 것으로 보아 다른 기와에 비하여 높은 온도에서 소성하였음을 보여준다.

결과적으로 모든 시료에서 주종을 이루는 광물으로는 석영과 장석 그리고 점토광물이 대부분이었으나, 일부 고온에서 소성하였을 때 나타나는 Mullite, Tridymite, Cristobalite 등이 검출되었다. 이로서 광물분석을 통하여 각 기와편의 개략적인 소성 환경을 알 수 있었다.

(3) 통계분석

점토는 지질학적인 공간 내의 한 장소 즉 점토층으로부터 채취된다. 또한 이 점토는 지질학적 또는 지구화학적 과정의 산물이며, 그 생성은 암석으로부터의 풍화에 기인한다. 암석이 풍화되어 점토가 되어도 점토에는 암석의 화학특성이 남아 있기 때문에 점토는 그 지역의 지반을 구성하는 암석의 화학특성을 반영한다. 그러므로 토기 바탕흙에 있어서 화학특성상의 차이는 지역 차를 반영하는 것이다[7].

이번 통계분석은 중성자 방사화 분석을 통하여 Ta, Nd, Sm, Eu, Ce, Lu, Cr, Yb, Hf, La, Ba, Cs, Sc, Rb, Co 등 총 15개의 미량성분원소의 농도를 결정하여 이용하였으며, 분석한 각 시료의 함량은 표 4에 나타내었다.

① 미량원소 분석

대상 시료는 3개소(천왕사지, 소토덩어리, 소성유구) 33점이었으며, 출토 유물별로 어떠한 관계가 있는지 미량원소들을 중심으로 조사하였다.

태토의 미량원소에 의한 상관관계는 지역에 따라 원료의 지질학적인 상태가 분명히 다를 경우에 가능하며, 분석된 미량원소 중에서 몇 개의 특성원소가 출토지 또는 지역간 특성인자로 작용하게 된다[8].

표 5는 지역간의 지질학적인 차이가나는 특성 기여원소를 분류하기 위해 통계처리한 값이며, 그것은 평균값의 차이가 있고, 표준편차 및 변동계수가 적은 Sm, Eu, Ce, Cs, Sc, Ba 등이 상관관계가 큰 원소로 구분되었다.

<표 4> 미량원소 함량

시료번호	ppm														
	Ta	Nd	Sm	Eu	Ce	Lu	Cr	Yb	Hf	La	Ba	Cs	Sc	Rb	Co
1	1.6	38	8.4	1.8	111	0.6	105	3.2	7.1	55	623	5.1	18	138	16
2	1.4	41	7.4	1.3	104	0.6	73	2.5	10.8	48	403	5.9	14	138	16
3	1.3	29	6.7	1.6	115	0.6	94	3.0	6.9	56	563	8.0	18	156	20
4	1.2	49	9.0	1.7	118	0.6	95	3.8	9.0	56	474	8.3	16	157	22
5	1.2	42	8.3	4.7	113	0.6	84	2.7	10.4	55	429	7.1	14	136	13
6	1.1	39	7.9	1.6	119	0.6	100	3.2	9.3	50	601	8.3	20	173	13
7	1.4	50	8.4	1.9	117	0.6	84	2.9	8.1	54	546	7.5	17	196	18
8	1.6	59	11.3	1.7	168	0.5	78	3.2	9.0	78	627	5.9	15	170	14
9	1.8	50	8.9	1.7	152	0.4	60	2.1	10.8	64	945	4.8	12	173	15
10	1.3	47	8.9	1.5	128	0.5	90	2.5	9.3	55	659	6.2	17	155	17
11	1.3	37	8.1	1.7	117	0.6	87	2.9	9.5	53	476	8.4	15	146	13
12	1.0	32	5.8	1.4	90	0.5	89	2.6	7.4	37	635	5.5	15	114	14
13	1.6	55	10.1	1.9	150	0.6	75	2.7	7.7	63	615	14.0	16	173	14
14	1.7	57	10.3	2.0	159	0.6	86	2.8	8.5	67	683	7.0	16	195	12
15	1.7	37	7.2	1.4	119	0.5	84	2.3	7.3	47	631	10.5	16	146	14
16	1.5	51	9.1	1.8	138	0.5	73	2.4	7.1	57	734	9.6	15	200	14
17	1.5	56	9.7	1.9	156	0.6	83	2.9	9.3	65	614	5.9	16	160	16
18	1.5	33	5.3	1.2	107	0.4	72	2.1	11.0	35	645	9.7	14	135	16
19	0.9	32	4.4	1.2	86	0.4	75	1.5	11.8	28	649	5.0	13	165	12
20	1.6	34	5.6	1.5	96	0.6	89	2.3	8.4	33	486	7.2	17	172	16
21	1.1	43	6.1	1.6	121	0.5	76	2.2	7.4	38	640	7.4	16	158	13
22	1.5	41	6.6	1.6	122	0.6	77	2.6	7.0	42	568	7.3	15	156	13
23	1.3	37	6.1	1.6	116	0.5	92	2.4	10.5	38	544	5.8	18	148	24
24	1.5	38	5.1	1.5	93	0.5	82	2.4	11.5	37	565	6.3	14	129	18
25	1.3	44	5.7	1.5	116	0.5	80	2.4	11.8	35	440	8.5	15	147	20
26	0.7	34	1.2	1.5	99	0.4	79	2.5	9.1	6	432	6.5	16	106	26
27	1.0	30	1.2	1.5	99	0.3	89	0.8	8.9	6	324	8.0	15	168	23
28	1.6	38	1.4	1.8	130	0.3	71	1.2	7.2	7	620	13.7	16	152	14
29	1.3	34	1.1	1.6	94	0.4	102	1.1	7.6	5	393	9.5	17	132	16
30	1.6	34	1.3	1.9	130	0.4	95	1.1	8.2	7	438	9.3	18	153	23
31	1.5	30	1.1	1.6	107	0.3	65	1.0	9.9	6	495	5.8	13	164	16
32	1.5	30	1.2	1.6	107	0.3	76	0.9	9.5	6	564	6.5	15	127	20
33	1.6	33	1.2	1.3	119	0.3	89	1.3	9.3	6	378	8.1	15	130	23

<표 5> 성분원소의 평균, 표준편차, 변동계수 대조표

출토유물 \ 원소		Ta	Nd	Sm	Eu	Ce	Lu	Cr	Yb	Hf	La	Ba	Cs	Sc	Rb	Co
천왕사지	평 균	1.4	39	5.6	1.7	116	0.5	85	2.3	8.8	35	536	7.7	16	150	18
	표준편차	0.2	8.4	3.3	0.6	18	0.1	10	0.8	1.3	22	100	2.2	1.6	22	4.0
	변동계수	0.2	0.2	0.6	0.4	0.2	0.3	0.1	0.4	0.2	0.6	0.2	0.3	0.1	0.2	0.2
소토덩이	평 균	1.4	47	8.2	1.5	135	0.4	71	2.3	11	57	741	5.2	13	169	14
	표준편차	0.5	13	3.5	0.3	44	0.1	9.4	0.9	1.4	26	177	0.6	1.8	4.2	1.1
	변동계수	0.3	0.3	0.4	0.2	0.3	0.2	0.1	0.4	0.1	0.5	0.2	0.1	0.1	0.0	0.1
소성유구	평 균	1.4	42	7.2	1.6	122	0.5	80	2.5	8.6	46	584	8.9	15	160	15
	표준편차	0.2	5.6	1.4	0.1	8.9	0.04	5.8	0.3	2.0	9.3	123	1.2	0.3	23	2.8
	변동계수	0.2	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.1	0.0	0.2	0.2

② 판별분석

판별분석은 Ronald Fisher에 의해 처음 도입된 통계적 기법으로, 종속변수를 D라 하고 독립변수를 X1, X2, X3, ...이라 하면 이들 독립변수들의 선형결합은 다음 수식과 같이 표현될 수 있으며 이를 판별함수라 한다. 판별변수의 값들을 대입하면 이에 대한 판별점수(D의 값)를 구할 수 있고, 이 판별점수에 의하여 집단을 구분하게 되는 방법이다[9].

$$D = \beta 0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + ... + \beta p X p$$

(D : 판별점수, β_0: 판별상수, β_1.....βp: 판별함수계수)

판별함수의 정준상관관계을 보게 되면 함수 1이 0.815, 함수 2가 0.473로 나타났다. 함수 1의 정준상관관계가 0.8이상으로 상당히 큰 값을 보이고 있다. 정준상관관계는 판별점수와 집단들간의 관련의 정도를 나타내는 것으로서, 이 값이 클수록 판별력이 뛰어나다. 고유값은 집단간분산을 집단내분산으로 나눈 값으로, 이 값이 클수록 좋은 판별함수를 나타내게 된다. 또한 Wilks의 람다는 집단내분산을 총분산으로 나눈 것으로 이 값이 적으면 집단간분산이 크고 집단내분산이 적다는 뜻이 된다[9]. 그러므로 함수 1의 판별함수의 경우는 고유값이 크고, Wilks의 람다는 작으며, 정준상관 또한 크므로 판별력이 상당히 좋음을 알 수 있으며, 함수 1, 2는 아래와 같은 식으로 나타내진다. 이에 해당하는 주요내용은 표 6과 같다. 또한 아래 두 판별함수에 의해 각 집단의 판별점수의 평균을 구한 것이 각 함수의 집단 중심점이며 이에 해당하는 내용은 표 7과 같다.

<표 6> 성분원소의 평균, 표준편차, 변동계수 대조표

함 수	고유치	정준상관	Wilks 람다	카이제곱	자유도	유의도
1	1.981	0.815	0.260	32.284	30	0.354
2	0.288	0.473	0.776	6.073	14	0.965

<표 7> 성분원소의 평균, 표준편차, 변동계수 대조표

출토유물 / 함수	천왕사지	소토덩이	소성유구
함수 1	.507	-4.270	-7.31E-02
함수 2	.208	.250	-1.234

<표 8> 집단간의 분류효율

출토유물	기와수	예측집단(%)		
		1	2	3
천왕사지	26	20(76.90)	0	6(23.1)
소토덩이	3	0	3(100)	0
소성유구	5	1(20)	0	4(80)
* 정확하게 분류된 표본비율(Hit Ratio) = 79.4%				

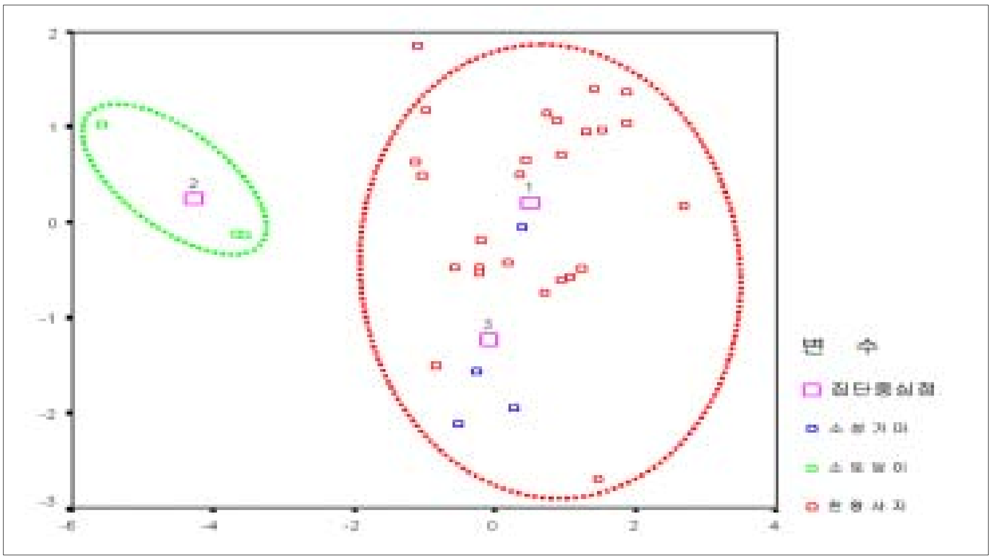
또한 표 8은 이 판별식이 실제의 집단을 얼마나 잘 분류해 주었는가를 나타내는 분류표로서, 천왕사지의 경우 각 집단 간 분류의 지표가 되는 Hit Ratio가 79.4%로서 상당히 높으므로 각 집단 간 분류가 잘 이루어짐을 볼 수 있었다.

그림 3은 시료의 분류형태로 26편중 20편은 1집단에 그리고 6편은 3집단에 포함되었고, 소성유구 5편중 4편은 3집단으로 분류되고 있음을 나타낸다.

이번 통계분석을 통하여 천왕사지에서 출토된 시편의 일부가 소성유구에서 수습한 것과 통계학적으로 하나의 군에 속하므로 서로 상호 연관성이 있음을 보여준 반면 소토덩이 3점은 2집단으로 완전히 100% 분리되어 천왕사지나 소성유구의 기와편과는 연관성이 없음을 나타낸다.

그림 3은 천왕사지와 소성유구에서 출토된 기와편들은 일부 겹쳐 있는 것이 보이나, 소토덩이와는 별개의 군을 이루고 있음을 관찰할 수 있다.

그러므로 천왕사지와 소성유구의 기와편들은 사용한 원료가 지질학적으로 연관성이 있음을 의미하며, 소토덩이와는 지질학적 연관성이 없음을 보여준다.



<그림 3> 판별함수결과 그래프

③ 편광현미경 관찰

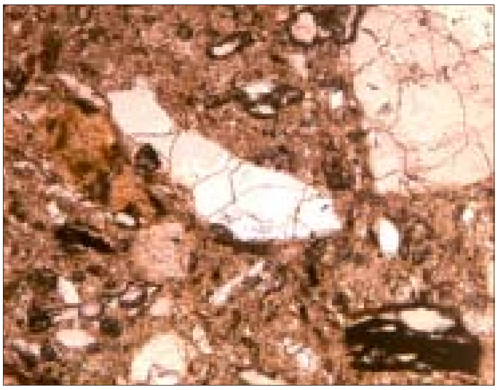
시료 가운데 특이하거나 다른 시료를 대표할 수 있는 수 개의 시료를 선별하여 박편을 만들고 이를 편광현미경상에서 관찰한 것이다.

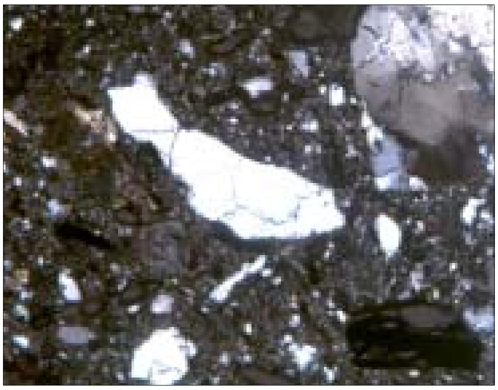
사진 3과 4는 No. 10번이며, 이 시료의 경우 석영이 내부에 크랙과 소량 녹거나 변질된 형태를 이루고 있으며, 장석의 경우 상당히 변질되어 쌍정 등이 관찰되지 않고 있다. 또한 대부분이 점토질 물질들이 공간을 충진하고 있는 것을 알 수 있다.

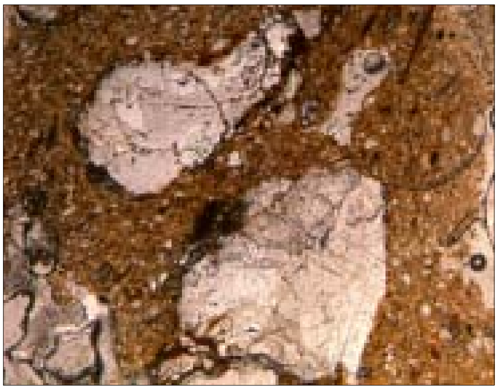
사진 5와 6은 11번 시료를 편광현미경 상에서 관찰한 것인데 석영입자의 내부에 많은 크랙이 존재하며, 외형이 둥근 형상을 하고 있다. 또한 석영의 주위에는 점토 입자들로 구성되어 있는데 이들은 갈색을 띄고 있으며, 실제로 운모 등이 많이 존재하고 있는 것을 볼 수 있다.

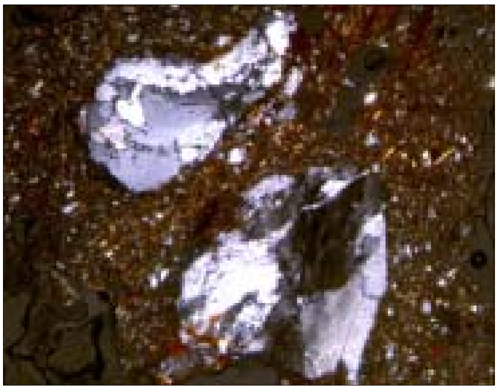
그림 7과 8은 21번 시료이며, 석영입자가 매우 작은 형태를 가지고 있으며, 장석의 경우 많이 변질되었고, 다량의 운모가 존재하고 있다. 대부분의 광물들이 미립의 상태로 존재하는 것으로 보아 광물들의 풍화가 상당히 진행된 상태의 점토를 사용한 것으로 사료된다.

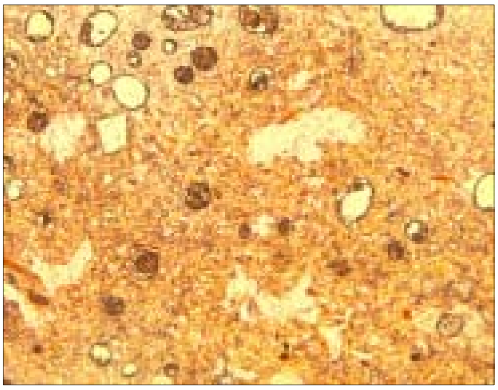
사진 9와 10은 No. 27번을 관찰한 것이다. 이 시료의 경우 장석이 완전한 쌍정을 보여주고 있으며, 장석입자의 주위가 많이 탈락된 상태이다. 또한 점토질에는 미립의 석영입자와 적갈색을 띄는 흑운모가 잘 관찰되고 있다.

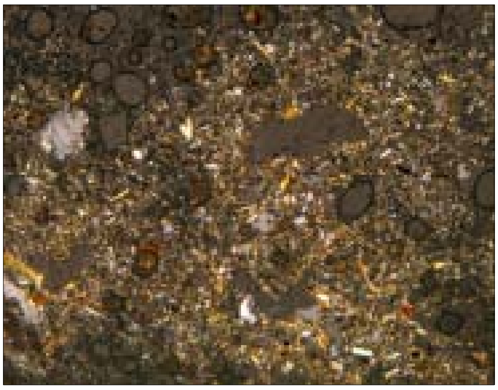

<사진 3> 석영, 장석(개방-10X)

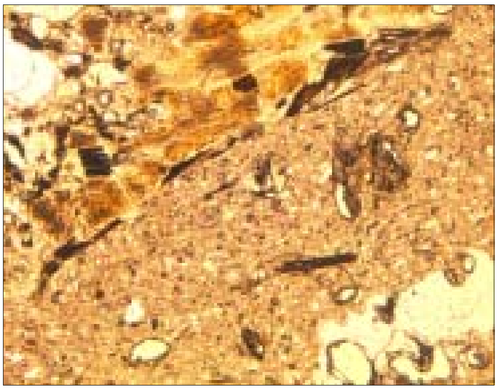

<사진 4> 석영, 장석(개방-10X)


<사진 5> 석영, 점토광물(개방-10X)

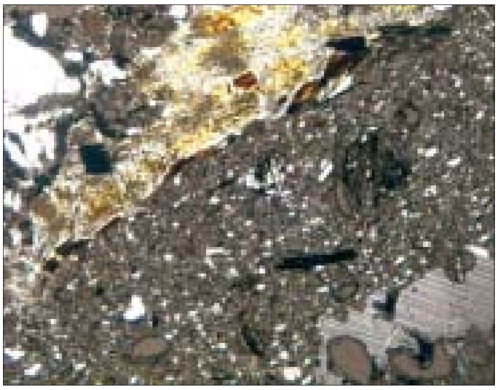

<사진 6> 석영, 점토광물(교차-10X)


<사진 7> 석영, 장석, 운모류(개방-10X)


<사진 8> 석영, 장석, 운모류(교차-10X)



<사진 9> 장석, 흑운모(개방-10X)



<사진 10> 장석, 흑운모(교차-10X)

2. 고 찰

(1) 흡수율의 경우 시료 14, 16은 약 4%이하로 측정되어 다른 기와편들에 비하여 경질기와임을 알 수 있으며, 이 시료를 제외한 연질기와의 평균 흡수율은 약 12%로 기존에 분석된 삼국시대 기와(부여 궁남지 10%, 익산 미륵사지 12%, 부여 용정리 10%, 부여 부소산성 12% 등)과 비슷한 양상을 나타내고 있다.

(2) 소성유구로 추정되는 곳에서 출토된 시료 16에서 점토질과 장석이 1,000°C이상 가열되었을 때 나타나는 고온결정상인 Mullite와 건물지내에서 발굴된 전(No. 7), 암기와(No. 14) 및 슬랙(No. 10) 등은 700 1,200°C이상에서만 나타나는 Tridymite와 Cristobalite 등이 나타나는 것으로 보아 고온 소성이 가능한 가마였을 것이다.

(3) 미량성분을 통한 판별 분석에서는 소성유구와 천왕사지내에서 출토된 기와 시료들은 서로 밀접한 상관관계를 나타내고 있다. 이는 소성유구에서 발견된 기와편과 천왕사지내에서 기와편과 사용원료의 지질학적인 연관성이 동일함을 나타내고 있다. 즉, 소성유구에서 제작된 기와를 사지의 축조에 사용했음을 반증한다고 할 수 있다.

(4) 편광현미경 관찰 결과 고온 소성한 경질 기와의 경우 장석과 점토광물 등이 심하게 변질되어 나타나는 고온결정상들이 관찰되며, 그 외 대부분 연질 기와편들은 석영과 장석, 흑운모 등이 많이 포함하고 있는 것을 알 수 있다.

IV. 맺음말

본 연구의 목적은 자연과학적인 접근을 통해 기와 가마로 추정되는 소성유구의 성격과 함께 소성유구와 건물지에서 출토된 기와들의 상관관계를 밝히기 위한 것이다.

분석결과, 천왕사지에서 출토된 기와는 경질 기와편들을 제외한 연질 기와편들은 다른 기와에서 볼 수 있는 흡수율(10%이상)과 비슷한 수치를 보이고 있다. 일반적으로 흡수율과 소성온도는 반비례 관계를 띠며, 흡수율이 낮을수록 소성온도가 높음을 보여주는 것이라 할 수 있다. 여기에서도 흡수율이 낮은 것은 고온에서 나타나는 결정체가 나타나고 있다. 그러므로 이번에 분석한 시료 14, 16의 경우 흡수율은 4%이하이고, 광물결정에 대한 동정결과 고온결정상인 Mullite, Tridymite, Cristobalite 등이 나타나는 것으로 보아 소성온도가 다른 기와 편들에 비하여 높았음을 의미한다. 이러한 고온결정상들이 기와 편들에서 검출됨으로서 천왕사지의 기와 가마는 고온 소성이 가능한 가마일 가능성을 뒷받침해 준다.

또한 미량성분을 통한 통계분석결과에서는 소성유구와 천왕사지내에서 출토된 기와가 밀접한 관련성을 가지고 있음을 보여준다. 이는 천왕사지 축조시 원거리에서 기와를 공급받은 것이 아닌 사지 내에 가마를 설치한 후 공급하였음을 알 수 있다.

따라서 천왕사지는 대량생산을 할 수 있는 기와 가마가 존재하였고, 필요시 기와를 만들어 사용한 것으로 추정된다. 앞으로 더 많은 자료의 축적이 이루어진다면, 산지추정 및 교역관계까지 논의할 수 있을 것으로 기대된다.

참고 문헌

김성구, 신광섭, 김종만, 강희천, 1992,「부여 정암리 가마터(Ⅱ)」,『국립부여박물관고적조사보고 제4책』, 국립부여박물관, p.42

정광용, 김명진, 오진규, 2002,「부여가탑리유적토기、기와의 산지 연구」,『한、불 보존과학의 만남』, 한국문화재보존과학학회, pp.7 8

박용완, 1972,「도자기 문화재 - 기와에 관한 연구」,『문화재의 과학적 보존에 관한 연구(Ⅰ)』, 과학기술처, pp.83 113

강경인, 최영기, 2000,「전남지방에서 출토된 고대 기와의 태토조성」,『보존과학회지 9』, 한국문화재보존과학학회, pp.11 20

강경인, 정창주, 1996,「광주 운남동유적 출토 토기·와편의 자연과학적 분석」,『광주 운남동유적』, 국립광주박물관, pp.166 187.

백종오, 2001,『경기북부지역 성곽출토 고구려 평기와 연구』, 단국대학교대학원, pp.57 66

최몽룡, 신숙정, 이동영, 1996,『고고학과 자연과학 - 토기편』, 서울대학교 출판부 제2판, pp.97 162.

강경인, 2000,『오창상대리·상평리 유적에서 출토된 토기의 자연 과학적 분석』, 청원오창유적(Ⅳ), pp. 465 502.

정충영, 최이규, 1988,『SPSSWIN을 이용한 통계분석』, 무역경영사, pp.360 388.

Abstract

A Study of Scientific Research on the Ancient Roof Tiles in Korea

Related to Cheonwangsa Temple of Hanam City

Hong, Jong-Ouk

Today, in the cultural properties research, there are several methods for knowing the culture of the past through a lot of information that remains and relics contain. Especially, statistical method like presumption of producing center were introduced from computer development at the early 20th century.

This study showed the characteristic about firing historic sites presumed as a tile-kiln in the remains of Cheonwang temple sites, Hanam, Gyeonggi province. Also, I used nature scientific methods for correlation between tiles excavated at historic sites and circumference building and obtained there results as follows.

First, soft tile parts showed similar water suction ratio(over 10%) like another tiles, except hard tile parts.

Second, identification about mineral crystallization in a sample showing low water suction ratio confirmed a result that Mullite, Tridymite, Cristobalite as high temperature crystal form were presented. I know that firing temperature was higher than the other tile parts from this result.

Third, statistical analysis from micro-component resulted that tiles excavated at firing historic sites and Cheonwang temple sites were closely connected.

As the results, I knew that the tiles got a supply after the establishment of tile-kiln, not at a long distance at the period of Cheonwang temple construction.

keyword :

1. Applied the statistical method like presumption of producing center were introduced from computer development
2. characteristic about firing historic sites presumed as a tile-kiln in the remains
3. soft tile parts showed similar water suction ratio(over 10%) like another tiles, except hard tile parts.
4. Mullite, Tridymite, Cristobalite as high temperature crystal form were presented.
5. tiles got a supply after the establishment of tile-kiln