

재질분석을 통하여 본 고구려기와의 우수성

우 철, 한 명 걸

경애하는 최고령도자 김정은동지께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

《역사학, 민속학, 고고학부문에서는 우리 인민이 창조한 우수한 민족문화유산들을 더 많이 발굴고증하고 계승발전시키기 위한 사업을 힘있게 벌리며 우리 나라의 역사를 외곡 날조하는 행위에 학술적으로 대처하기 위한 과학연구사업에 힘을 넣어야 합니다.》

고구려시기의 역사유적들에서 많이 나오는 고구려기와는 중세조선의 요업기술발전수준을 반영하는 우리 나라의 대표적인 문화유산의 하나이다.

고구려기와는 고구려인민들의 높은 창조적지혜와 재능, 오랜 기간에 걸쳐 축적한 풍부한 경험과 기술, 고심어린 탐구와 노력뿐아니라 당시 사회의 경제와 문화발전수준도 반영한다.

이 글에서는 고구려기와의 재질분석을 통하여 기와제작기술의 중요한 구성부분을 이루는 기와의 원료와 배합비, 소성온도, 소성환경, 발색요인을 추정하고 그 측면에서 고구려기와의 우수성을 밝히려 한다.

우리 나라에서 알려진 고구려시기의 역사유적에서는 대부분 고구려기와들이 적지 않게 나온다.

여기서는 고구려시기의 역사유적들가운데서 정릉사터와 장수산성에서 나온 붉은색 및 회색기와 각각 1건, 청암동토성과 안학궁터에서 나온 붉은색, 회색, 누런색기와 각각 1건, 표대유적 31호집자리에서 나온 붉은색기와 1건, 초산군 련무리와 정동리 돌칸흙무덤에서 나온 회색기와 각각 1건 모두 14건의 기와시료들을 연구재료로 선택하였다.

분석은 편광현미경분석과 X선회절분석법(XRD), 발광스펙트럼분석법, 2가 및 3가철에 대한 습식화학분석법으로 하였다.

편광현미경분석에서는 기와시료들을 박편으로 만들고 편광현미경에서 관찰하여 기와들의 광물조성에 대한 정보를 얻었다. XRD분석에서는 기와시료를 미세한 분말로 만들고 X선회절분석기(분석기대자호: X'Pert)를 리용하여 기와들의 광물상조성을 결정하였다.

발광스펙트럼분석에서는 발광분광분석기(기대자호: ДФС-12)를 리용하여 기와들의 원소조성을 결정하였다.

습식화학분석에서는 기와분말시료를 불산과 류산으로 분해하고 디페닐아민을 알림약으로 하여 중크롬산칼리움정법으로 Fe^{2+} 및 Fe^{3+} 의 함량을 결정하였다.

고구려기와시료들의 분석결과는 다음과 같다.

편광현미경분석결과

고구려기와의 광물조성은 기본적으로 비교적 많은 량의 미립석영과 미량의 장석 및 운모이며 그외에 미량의 철 및 금속용융물들이다.

석영은 드물게 0.5~0.9mm정도의 큰 립자들도 있지만 전반적으로 0.01~0.05mm사이

의 미세한 립자들이며 그 함량은 대체로 20~30%사이이다. 장식은 미사장석, 정장석 등의 카리장석들로서 그 함량은 5%이하이며 그외에 백운모 등의 운모류가 드물게 나타난다.

특징적인것은 립자들의 립도가 아주 작으며 유리화가 잘된것이다.

유리질에는 석영과 약간량의 파쇄된 흑운모, 장석, 철의 용융물들과 점토물질들이 있다. 청암동토성과 아양리토성유적에서 나온 붉은색기와에서는 미립침상의 물리트결정들이 적은 양으로 형성된것을 볼수 있다. 반투명한 유리질과 용융잔사주위에서 미립침상의 물리트결정들이 희박하게 형성되었으며 일부는 형성초기단계의것들로서 불완전한 형태를 띠고있다.

반면에 회색기와들에서는 소결이 잘되어 물리트가 많은 양으로 형성되었으며 장석이 분해되어 유리질을 이루고있다. 철용융물들의 형태는 둥근형, 타원형으로서 크기는 0.1~0.7mm사이이며 일부 그 이상의것들도 있다.

청암동토성과 련무리돌칸흙무덤유적에서 나온 기와들에서 모래의 조성은 일부 규암, 규장암, 운모들로 이루어져있다.

X선회절(XRD)분석결과

X선회절분석에 의하면 모든 기와시료들에서 α -석영이 기본회절선으로 나타나고있으며 그외에 일부 α -린석영과 장석의 회절선들도 관찰되었다.

련무리돌칸흙무덤의 회색기와에서는 방석영의 피크가 미약하게 나타나고있다.

붉은색기와들에서 적철광(α - Fe_2O_3)이 관찰되고있으며 회색, 회청색기와들에서 철감람석(Fe_2SiO_4)과 철첨정석(FeAl_2O_4), 자철광(Fe_3O_4)의 회절선들이 미약하게 관찰되었다.

발광스펙트럼분석과 습식화학분석결과

우선 발광스펙트럼분석에 의하면 고구려기와시료들에서 SiO_2 함량은 60~70%사이이며 Al_2O_3 함량은 15~18%사이에 있다. 철함량은 4~9%사이이며 기타 Cr, Mn, Cu, Ni 등의 발색원소들은 $10^{-3}\%$ 또는 흔적량이다. Ti은 0.1%정도이며 Co와 Pb는 나타나지 않는다. 이것은 기와의 원소조성에서 SiO_2 과 Al_2O_3 이 주성분을 이루며 Fe_2O_3 과 FeO함량이 4~9%, 기타 Cr, Mn, Cu, Ni 등이 미량으로 포함되어있다는것을 보여준다.

다음 습식화학분석에 의하면 붉은색 및 누른색기와에서 2가산화철함량은 0.1~0.7%사이로서 전체 산화철함량중의 0.1~10%의 비율을 차지하며 반대로 회색, 회청색기와들에서는 2~6%사이로서 전체 산화철함량중의 47.3, 73.0%의 비율을 차지한다. 또한 붉은색 및 누른색기와들에서 3가산화철함량은 5~9%사이로서 전체 산화철함량의 90%이상의 비율을 차지하며 반대로 회색, 회청색기와들에서는 1~3%사이로서 전체 산화철함량중의 27, 52.7%의 비율을 차지한다.

이와 같은 분석결과에 의하면 고구려기와는 한마디로 원료인 점토와 모래의 정선과 합리적인 배합, 높은 소성온도와 안정된 소성환경의 보장 등 과학적인 기와제작공정에 의하여 얻어진 우수한 규산염소결체이라고 볼수 있다.

분석을 통하여 본 고구려기와의 우수성은 첫째로, 고구려기와가 잘 정선된 점토에 매우 보드라운 모래를 합리적인 배합비율로 섞어 만든 기와라는데 있다.

일반적으로 흙기와소성품에서 석영립자의 립도는 0.1~1.0mm사이가 가장 적합하며 그 배합비율은 30%를 넘지 말아야 한다.

석영의 립도와 함량에 따르는 기와소성품의 세기는 립도가 0.2mm인 석영이 20~25% 포함된 기와가 가장 높으며 립도가 2~3mm인 석영이 20~25% 포함된 기와의 세기가 가장 낮다.*

* 《흙기와생산》 공업출판사 주체94(2005)년 27~29페이지

또한 같은 온도에서 소성된 기와라고 하더라도 석영립자의 립도가 작을수록 기계적 세기가 높아지고 기공률도 작아진다.*

* 《일본도자기협회학술논문집》(일문) 1999년 제107권 제7호 일본도자기협회 678~681페이지

고구려기와의 광물조성을 이루는 장석과 석영, 운모 등 광물립자들의 립도는 모두 1.0mm이하이며 그 함량은 20%~30%사이로서 기와의 기계적세기를 충분히 보장할수 있게 되어있다.

이로부터 고구려의 기와제작자들이 기와의 원료인 바탕흙과 모래를 충분히 정선하고 합리적으로 배합하여 리용하였다는것을 알수 있다.

분석을 통하여 본 고구려기와의 우수성은 둘째로, 고구려기와의 기와제작에 필요한 소성온도를 충분히 합리적으로 보장하여 만든것이라는데 있다.

고구려기와시료에 대한 편광현미경 및 X선회절분석결과에 의하면 모든 기와시료들에서 석영의 상전이가 일어나 립석영이 형성되었으며 일부 회색기와들에서는 방석영도 형성되었다. 이것은 모든 기와들이 β -석영의 β -립석영으로의 전이온도인 870°C이상에서 충분한 시간동안 소성되었으며 일부 회색기와들이 방석영이 형성되는 1 100°C이상으로 가열되었다는것을 의미한다.

한편 붉은색기와들에서는 전반적으로 물리트가 형성되지 않았으며 일부 시료들에서만 미량으로 형성된 물리트결정을 관찰할수 있었다. 반면에 회색기와들에서는 전반적으로 물리트가 비교적 많이 형성되었으며 장석질유리가 형성된것도 볼수 있다.

자료에 의하면 점토의 소성시에 물리트가 형성되기 시작하는 최저온도는 950°C이며 이 온도에서 1h정도의 가열에 의하여 침정석과 미량의 물리트결정이 형성된다.*

* 《유럽도자기협회잡지》(영문) 1998년 제18권 제9호 엘즈비어과학출판사 1145~1152페이지,
《국제무기물질잡지》(영문) 2001년 제3권 제7호 엘즈비어과학출판사 625~632페이지

이로부터 붉은색기와는 대체로 950°C이하에서 소성된것이며 일부 그 이상에서 소성된것들도 있다는것을 알수 있다. 그러나 회색계통의 기와들은 950~1 000°C이상에서 비교적 오랜 시간 소성된것들로서 붉은색기와에 비하여 높은 온도에서 충분한 시간동안 소성되었다는것을 알수 있다.

이와 같은 결과들은 고구려의 기와제작자들이 여러가지 색깔의 기와제작에 요구되는 높은 소성온도를 충분히 보장할수 있는 가마시설을 축조하고 필요한 온도를 유지하면서 기와를 구워내었다는것을 보여준다.

분석을 통하여 본 고구려기와의 우수성은 셋째로, 고구려기와의 소성전기간 산화 또는 환원의 선택된 소성환경을 보장하면서 붉은색, 회색, 회청색 등 여러가지 다양한 색깔

로 만들어진것이라는데 있다.

고구려기와가 결면으로부터 안속에 이르기까지 붉은색, 회색, 회청색 등의 색깔을 고르게 띠고있는것은 기와제작자들이 소성과정에 나타나는 소성품의 색깔변화현상과 그 요인들에 대하여 깊이 파악하고 충분히 활용하였다는것을 보여준다.

기와의 색깔은 기와바탕흙속의 발색원소들이 소성결과 어떤 화합물조성을 이루는가에 따라 결정된다.

고구려기와시료에 대한 원소분석결과에서는 붉은색, 누런색, 회색, 회청색기와들에서 산화철함량이 4~9%사이이고 코발트는 발견되지 않았으며 기타 티탄, 크롬, 망간, 동 등의 발색원소들은 없거나 그 함량이 발색작용을 할수 없는 범위에 있다. 이것은 고구려기와의 발색원소가 철이며 소성환경에 따르는 철의 화학적변화에 의하여 기와의 색이 이루어졌다는것을 보여준다.

분석결과에 의하면 붉은색기와의 소성환경은 산화, 회색 및 회청색기와의 소성환경은 환원환경이다.

기와시료에 대한 2가철 및 3가철함량분석결과에서도 역시 붉은색기와들에서 철의 대부분은 3가철이며 그 함량은 90%이상으로서 2가철에 비하여 절대적으로 높다. 반면에 회색 및 회청색기와들에서는 2가철이 전체 철함량의 대부분을 차지하고있다. 그리고 X선 회절분석에 의하면 붉은색기와에서 산화철은 기본적으로 적철광이며 회색 및 회청색기와들에서는 철감람석, 철침정석, 자철광 등의 2가철화합물들이다.

붉은색기와와 회색기와는 석영, 장석 등의 기본광물조성에서 큰 차이가 없으며 다만 물리트형성과 산화철의 형태에서 차이가 있을뿐이다. 즉 붉은색기와는 회색기와에 비하여 상대적으로 낮은 온도에서 소성된것으로 하여 물리트가 형성되지 못하였거나 혹은 드물게 형성되었지만 회색계통의 기와는 높은 온도에서 소성된것으로 하여 물리트가 많이 형성되었다. 또한 붉은색기와에서 철은 기본적으로 산화환경에서 형성되는 적철광으로 존재하지만 회색기와들에서는 환원환경에서 형성되는 2가철화합물들을 이루고있다.

원소조성을 보아도 붉은색기와와 회색기와는 2가 및 3가 산화철의 함량이 차이날뿐 다른 원소조성에서는 큰 차이가 없다.

이것은 붉은색기와는 산화소성의 결과 바탕흙속의 산화철이 대부분 3가상태로 산화되면서 붉은색색소인 적철광으로 되어 붉은색계렬의 색을 내게 되었으며 반대로 회색 및 회청색기와들은 환원소성의 결과 산화철이 2가상태로 환원되어 회색, 청색 등의 색을 띤 2가철화합물들로 넘어가면서 해당한 색을 내게 되었다는것을 보여준다.

자료들에 의하면 850~1050℃사이에서 산화소성된 중세시기의 붉은색 및 밤색계통의 질그릇과 벽돌들에서 붉은색색소는 바탕에 5~10%정도로 포함된 적철광이다.*

* 《응용점토과학》(영문) 2004년 24권 3호 엘즈비어과학출판사 313~326페이지

산화철은 산화소성시에 보드라운 립도와 충분한 소성온도 및 시간이 보장되어야 모두 적철광으로 넘어갈수 있다. 자료에 의하면 붉은색의 적철광안료를 얻기 위하여 일반적인 굴식로나 함형로에서 산화소성할 때 초기 산화철의 20%~30%만이 적철광으로 넘어가며 여러번 반복소성하여도 모두 100% 넘어가지 못하였다. 이 미립산화철분말은 850℃~950℃사이의 온도에서 10h이상 공기속에서 부단히 교반하면서 산화소성하여야

100% 적철광으로 전환된다. 그러므로 충분한 립도와 가열온도, 가열시간이 보장되지 않고서는 기와바탕에 적철광과 함께 채 산화되지 않은 2가철화합물들이 일부 남아있게 되는것이다.

고구려의 붉은색기와바탕의 산화철이 대부분 적철광의 형태를 띠고있는것은 기와가 산화환경에서 비교적 충분한 시간동안 산화소성되었다는것을 보여준다.

또한 환원소성시에는 산화철이 3가상태인 Fe_2O_3 로부터 2가상태인 FeO 로 환원되면서 점토의 분해로 인하여 유리되는 SiO_2 , Al_2O_3 등과 반응하여 철감람석, 철침정석, 자철광 등의 2가철화합물들을 형성한다. 실례로 산화철함량이 5%정도인 고령토를 환원소성할 때 FeO 가 Al_2O_3 과 반응하여 철침정석을 형성하였다. 이때 950, 1 200°C에서 물리트가 형성되었으며 방석영, 완화휘석 및 철감람석 등의 형성이 동반되었다.*

* 《일본도자기협회학술논문집》(일문) 2000년 제108권 제10호 일본도자기협회
876~880페이지

이러한 2가철화합물들은 기와가 회색, 청색 등의 색깔을 내게 하는 발색인자들이다. 연구자료들에 의하면 중세시기의 회색 및 청색토기제품의 색깔이 소성품바탕의 철침정석에 기초하고있는 실례들이 알려지고있다.*

* 《유럽도자기협회잡지》(영문) 2004년 24권 5호 엘즈비어과학출판사 821~824페이지

우리 나라의 점토속에 포함되어있는 산화철은 주요하게 적철광, 수적철광, 침철광, 수침철광, 갈철광 등의 3가철화합물들이며 3가산화철함량이 2가산화철함량에 비하여 상당히 높다.

고구려기와들이 발굴된 안학궁터주변에는 적철광, 침철광 등이 포함되어있는 산화철질점토가 지표면에 드러나있다. 동명왕릉의 정릉사터유적일대의 주변산기슭을 비롯하여 여러곳에 3가산화철함량이 높은 적색 및 황색점토가 지면으로부터 3~4m 깊이로 깔려있다. 이러한 산화철질점토는 립자크기가 대부분 10 μm 이하로 작으며 푸실푸실한 흙모양 또는 쉽게 부스러지는 덩어리모양으로 0.5~2m 또는 그 이상의 두께로 우리 나라의 많은 곳에 분포되어있다. 그리고 그 광물조성은 고령석, 일리석, 몬모릴론석 등의 점토광물들과 함께 적철광, 수적철광, 침철광, 수침철광, 석영, 장석 등이며 전체 산화철함량은 1~30%이다. 그가운데서 3가산화철함량은 5~10% 또는 그 이상이며 2가산화철함량은 0.1~수%정도로서 상대적으로 적다.*

* 《광물질천연안료자원편람》 과학백과사전출판사 1987년 25~36페이지

이 적철광, 침철광 등의 3가철화합물들은 소성시에 산화 및 환원조건에 따라 3가 및 2가상태의 철화합물들로 변화되고 그 비율에 따라 해당한 혼합색을 나타내면서 기와의 색을 형성하게 된다.

회색 및 회청색기와들에서 2가철화합물들이 검출되고 기와가 고르롭게 회색을 띠고있는것은 기와가 환원환경하에서 충분히 오랜 시간동안 환원소성되어 3가철화합물이 회색, 청색 등의 2가철화합물들로 전환되었음을 보여준다.

고구려기와의 붉은색, 회색, 회청색 등의 색깔은 바로 기와바탕흙속의 산화철이 산화

및 환원환경에 따르는 화합물형태변화에 의하여 형성된것이다.

고구려시기의 붉은색 및 회색기와들은 원료흙과 첨가제들이 유사하지만 목적하는 색깔에 따라 서로 다른 방법으로 소성한것으로 하여 즉 소성온도와 소성환경이 서로 다른 결과에 물리트형성과 산화철의 형태변화에서 현저한 차이가 생기고 서로 다른 색깔을 띠게 되었던것이다.

물론 붉은색기와의 내부에 채 산화되지 않은 침철광, 갈철광 등의 산화철이 일부 남아있는것으로 하여 정도에 따라 붉은 황색, 붉은 갈색 등의 중간색을 띠는 경우도 있으나 기본적으로는 모두 붉은색이 절대적으로 우세한 색상을 띠고있으며 회색기와도 비록 그 색이 진하고 연한 차이는 있으나 모두 회색계통의 색을 고르롭게 띠고있다.

회색기와들이 고르롭게 회색을 띠고있는것은 소성시에 환원분위기가 충분한 시간동안 보장되어 기와내부의 산화철이 회색, 청색을 띠는 2가철화합물상태로 환원되었으며 소성전기간과 소성이 끝난 후 냉각될 때까지 로의 밀폐가 잘 보장되었다는것을 보여준다.

고구려기와의 제작자들은 원료점토로부터 붉은색, 누른색, 회색, 회청색 등 다양한 색깔을 띤 기와들을 제작하는데 요구되는 온도, 소성환경과 시간을 파악한데 기초하여 고온에서 오랜 시간 산화 및 환원소성하여 다양한 기와들을 만들어내었던것이다.

이와 같이 고구려기와는 합리적인 원료선정과 그 배합비, 소성환경과 소성온도, 발색요인 등 기와제작기술의 모든 공정에 대한 풍부한 경험과 지식에 기초하여 제작한 우수한 소성품으로서 우리 민족의 귀중한 문화유산으로 된다.

실마리어 고구려기와, 분석