

승례문 기와의 물리적 특성 연구

정 광 용*

(한국전통문화학교 보존과학과 교수)

주제어 : 전통기와, 승례문기와, 내동해성, 흡수율, 소성온도, 물리적 특성

1. 서론

승례문의 기와는 1963년에 실시한 해체·보수공사와 1997년의 보수공사에서 교체되었다¹⁾. 이 중 1997년 실시된 보수공사는 전통방식으로 제작된 기와가 아니라 현대의 제작방식으로 생산된 기와가 사용되었다. 또한 현재 고건축물이나 사찰 보수에는 현대식 제작방법인 기계식 가마로 소성한 기와를 사용한다. 현대기와와 전통기와는 물리적 특성에서 차이점을 보이는데, 전통기와에 비해 현대기와는 비중이 높아 지붕의 물리적인 문제를 일으킬 수 있다. 또한 현대기와는 전통기와와 달리 고색창연한 색을 재현하지 못해 전통적 건축물에 이질감을 발생시키는 문제점이 있다²⁾³⁾⁴⁾. 때문에 승

례문 지붕의 기와 복구 작업을 위해서는 전통기와의 사용이 필수적이다. 하지만 기준이나 적용방법이 정립되지 않았기 때문에 기와의 물성을 비교·분석하여 전통기와의 제작에 대한 지침서를 제시해야 할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 과학적 조사 연구의 결과를 바탕으로, 전통 기와의 소성온도, 온도별 물성과 시편의 색상, 비중 및 흡수율 그리고 동과율 등을 측정⁵⁾⁶⁾하였다. 또한 기존 기와의 재질적 특성과 물리적 성질 등을 비교 분석하고⁷⁾, 전통기와의 물성 및 성능을 개선할 수 있는 방안을 연구하였다.

문양조사, 문화재청, 2000

* 교신저자, 이메일: kychung@nuch.ac.kr

1) 국립문화재연구소, 「승례문 화재 피해현황 및 수습보고서」, 『승례문』 국립문화재연구소, 2008, pp.13~15

2) 김왕직·김석순, 「기와의 보존과 활용」, 건축, Vol. 49 No. 12, 대한건축학회, 2005, pp.66~69

3) 김성구, 『옛기와』, 대원사, 1992

4) 최맹식, 『朝鮮時代 기와製作』, 고궁 건물막새 등

5) 양동윤·김주룡·한창균, 「고구려 기와의 화학분석과 강도측정을 통한 제작기법 고찰」, 고구려연구, Vol. 9, 2000, pp.13~16

6) 고민정·김규호, 「경기도 포천시 길명리 가마터 출토 흑유자기와 백자에 대한 특성분석」, 『보존과학회지』, Vol. 22, 2008, p.47

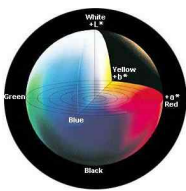
7) 정광용·김명진, 「중성자 방사화분석에 의한 고려후기 기와의 산지 연구」, 『한국분석과학회』, Vol. 14, 2001, pp.476~477

2. 분석기기

2-1. 색도계

눈으로 느끼는 색(색감 또는 색자극)은 색의 측색적(測色的)인 성질과 밝기(자극값)에 의해 정해지는데, 그 중에서 밝기를 무시한 색의 성질을 색도라 한다. 색도표시법(色度表示法)에는 여러 가지 방법이 있는데, 주로 주파장(主波長)과 순도를 결합시켜서 표시하거나 그 색에 포함된 3원색의 비율에 의해서 표시한다.

일반적으로 색도를 측정하는 기기로는 3색 색도계가 있다. 이것은 색도계의 기본색인 빨강·녹색·파랑의 3색광을 증감혼합해서 얻은 색과 측정하고자 하는 빛의 색을 비교하도록 만들어져 있다. 혼합색이 측정할 빛의 색과 같아 보일 때의 기본색의 양(색도계의 3자극값)을 눈금에 의해 파악하고, 그 양을 기준으로 색도좌표표를 산출한 값을 CIE(국제조명위원회:ICI) 표준표색계에 따른 값으로 환산하면 색도가 산출된다.



<그림 1> L*a*b 색도표



<그림 2> 색차계 - A/6800, BYK, US

색도계에는 이러한 등색(等色) 방식 이외에, 광검지와 필터를 결합해서 측정할 빛을 필터로 3분하고 직접표준표색계에 따른 3자극 값을 측정하여 색도좌표를 구하는 방식도 있다.

CIE 표색계는 가장 과학적인 표색법이며, 분광광도계(分光光度計)에 의한 측정값을 기초로 하여 모든 색을 $x'y'Y$ 라는 세 가지 양으로 표시한다. Y는 측광량으로 색의 밝기 양,

$x \cdot y$ 는 한 조로 해서 색도를 나타낸다. 색도란 밝음을 제외한 색의 성질로서 $x \cdot y$ 축에 의한 도표(색도표) 가운데의 점으로서 표시된다. 각 파장의 단색광(單色光)의 색도를 도표 위에서 구하고 그것들을 선으로 연결한 다음에 순자(純紫)·순적자(純赤紫)의 색도점을 연결하면 도표 상에 말굽 모양이 그려지고 모든 색이 이 안에 포함된다.

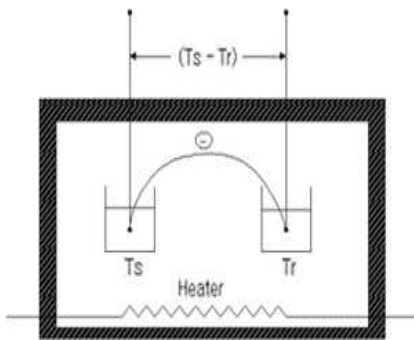
2-2. 시차열분석(Differential Thermal Analysis, DTA)

여러 가지 기기분석 중에서 시차열분석(DTA)은 온도 변화에 대한 물질의 상태를 연구할 수 있는 독특한 방법이다. 온도 변화에 따른 여러 가지 현상을 빠르면서도 높은 정밀도로 해석할 수 있기 때문에 물질의 물성 연구에서 제일 먼저 사용되는 방법이기도 하다.

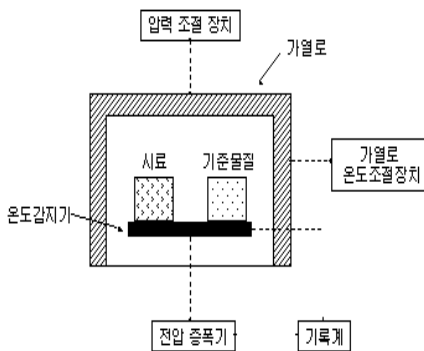
DTA는 시료를 일정한 속도로 가열 혹은 냉각시켰을 때 기준물질(그 온도 범위 안에서는 열적 특성의 변화가 없는 물질)과 시료와의 온도 차이를 보상 없이 단순히 읽어내고 이를 열량의 변화로 환산하는 것이다. 온도차가 생기는 것은 시료에 발열 혹은 흡열 변성이 있었던지 어떠한 화학반응이 일어났다는 것을 의미한다. 예를 들어 시료의 상변화, 용융, 결정화, 탈수, 해리, 분해, 산화, 환원 등이 이에 해당한다. 시료의 화학적 혹은 물리적 변화 때문에 일어나는 기준물질과의 온도차는 <그림 3>, <그림 4>에서와 같은 방법으로 측정된다. 여기에서 T_s 와 T_r 은 각각 시료와 기준물질의 온도이며 그 차이인 $\Delta T (=T_s - T_r)$ 가 온도의 함수로 기록된다. DTA 곡선의 피크 수, 모양 및 위치로부터 시료의 종류나 성질을 정성적으로 파악할 수 있으며 피크의 넓이는 엔탈피의 변화에 해당되므로 반응열의 정량적인 측정도 가능하다. 또한 어떤 물질의 반응열을 알

고 있으며 그 물질이 다른 물질과 혼합되어 있을 때, 그 물질의 양을 피크(peak)의 넓이로부터 계산해낼 수 있다. 이 때 피크의 시작은 변성이나 반응의 시작을 뜻하며 피크의 정점은 변성이나 반응의 완료를 뜻하는 것은 아니고 오히려 피크가 원상으로 돌아오는 온도가 그 현상이 끝남을 의미한다. 온도의 측정에는 thermocouple을 쓰기 때문에 mg 단위의 시료를 사용할 수 있으며, 이와 같이 적은 양의 시료를 사용할 때 더욱 편리하다.

DTA의 장점은 반응열의 변화 뿐 아니라 시료의 모양이 달라짐에 따라 열전달이 달라지고 비열에 의한 열용량의 변화를 기록할 수 있어 측정조건을 바꾸어주면 여러 가지 변화를 연구할 수 있다는 점이다.



<그림 3> 기본적인 DTA의 시스템 원리



<그림 4> DTA 장치 구성도

2-3. 전암대자율

전암대자율은 토양광물에 포함된 불투명광물에서 나타나는 강자성 광물인 자철석의 함량을 파악할 수 있는 암석학적 연구방법으로 외부 자기장에 대한 자화강도를 의미하며 $I = k \times H$ 로 정의 된다. 여기서 I는 자화강도, H는 자기장, k는 대자율로서 물질의 자기적 특성을 결정하는 상수이다. k는 진공에서 0이고 보통 자화강도의 평균대자율분 $2.51(\times 10^{-3} \text{ SI unit})$ 이다.

대자율은 암석에 함유된 자철석의 함량과 정의 상관관계를 가지며, 대자율을 통해 자철석을 함유한 암석의 광역적 분포를 파악할 수 있고 1.256을 기준으로 이보다 높은 경우는 자철석 계열로, 낮은 경우는 티탄철석 계열의 암석으로 구분한다.

기와의 경우, 태토인 토양광물이 함유하는 자철석의 함량에 따라 대자율의 차이를 보이며 제질의 동질성 유무를 판단할 수 있는 산지추정의 기초자료가 된다. 그러나 암석과 달리 기와는 토양을 소성하여 제작하므로 소성 중에 광물상의 변화가 일어난다. 특히 철을 함유한 광물이 고온소성과 냉각과정을 거치면서

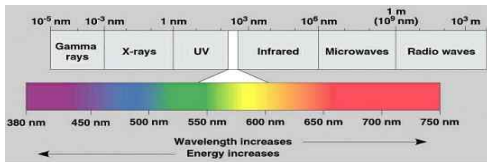
[표 1] 전암대자율 해석표

자성	광물	대자율(S*10 ⁻⁶)
강자성	자철석	80,000 ~ 20,000
	자황철석	6,100 ~ 1,500
상자성	티탄철석	271 ~ 113
	알만딘	124 ~ 50
	휘석, 각섬석	130 ~ 26
	흑운모	80 ~ 23
	녹염석	24
반자성	백운모	8 ~ 1
	금홍석	2
	석석	-0.08
	형석, 중정석	-0.30 ~ -0.28
	석영, 정장석, 방해석	-0.37 ~ -0.36
	인회석	-0.46

대자율은 약간씩 증가한다고 알려져 있으며 태도가 함유한 철 함량과 소성온도에 따라 차이도 나타날 수 있다.

2-4. 열적외선 조사

적외선 열화상이란 대상물을 열적외선 영상 장치로 촬영해 표면의 미세한 온도 차이로부터 물체의 성질이나 물체 내부의 상황을 비접촉, 비파괴로 조사하는 방법을 말한다. 적외선은 파장이 약 0.72~1000 μm 까지의 전자파로 가시광선의 장파장에서 마이크로파의 단파장까지의 총칭이다. 아래 <그림 5>는 빛의 스펙트럼에서 적외선이 차지하는 위치를 보여준다.



<그림 5> 빛의 스펙트럼

적외선은 물질의 온도와 밀접한 관련이 있어 절대온도 0K 이상의 온도를 가진 물체는 표면에서 적외선을 방출한다. 적외선 영역의 전자파를 감지하는 소자를 가진 적외선 카메라를 이용하면 일반적인 광학 비디오카메라와 동일한 방법으로 적외선 화상 또는 대상물의 온도 분포 화상을 얻을 수 있다. 적외선은 자외선이나 가시광선에 비해 파장이 길고 미립자에 의한 반사나 흡수가 적기 때문에 대기를 잘 투과하여 거리의 제한이 미미한 것이 장점이다.

물체의 표면은 기온 또는 복사열의 변화에 따라 각 재료의 열전도율이나 비열 등의 물리적 성질의 차이 또는 표면 형상, 상태의 차이 및 표면 근방에 공동이나 박리가 있는 경우 다른 온도변화를 나타낸다. 따라서 건전부위와 결함부위 간에는 온도차이가 발생하게 되며

이것을 적외선 카메라로 관측하여 공동이나 박리를 검출하게 된다. 이러한 검사는 온도의 역전이가 일어나는 새벽과 저녁시간은 피하고 온도차이가 많이 나는 시간대에 실시하는 것이 유리하며 기온의 일교차가 5 $^{\circ}\text{C}$ 이상이 되면 측정하기 쉬워진다.

2-5. X선 회절분석

X-선 회절분석은 X선을 조사하고 시료에 따라서 회절되는 X선을 측정, 격자 간격으로부터 화합물을 동정하는 방법으로 광물조성이 단일 원소로 구성되어 있는지 아니면 혼합 원소로 구성되어 있는지를 조사하여 그 결정구조를 알아보는데 사용한다. 물질은 그것이 순수한 상태로 있든지 또는 화합물의 한 성분으로 있든지 항상 독특한 X-선회절 무늬를 갖는다. 회절분석은 함유하고 있는 성분의 화학원소로서가 아니라 실제하는 물질로서의 특성을 밝힐 수 있다.

암석, 토양시료, 그리고 기와의 광물조성의 화합물 상태를 알아보기 위하여 X-선 회절분석기(기종: Rigaku Corporation, D/MAX 2200/PC)를 이용하였다. 분석 조건은 2 theta 3~70deg, scan speed는 1sec/step, step size는 0.03deg, 전압은 40kV, 전류는 30mA이다. 분석의 Target는 구리(Cu)다.

3. 연구방법

3-1. 대상시료

승례문 복구용 전통기와 제작을 위한 기와의 물리적 특성을 알아보기 위해 실험하였다. 실험에 사용된 시료는 장흥 제와장 제작기와, 현대기와, 승례문기와 및 남한산성 기와이며 (그림 6), 이 중 각 실험조건에 맞는 시료를 선정하여 실험을 진행하였다.



A:승레문 암기와편1963이전 B:승레문암기와1963 C:남한산성-조선수키와1
 D:남한산성-조선수키와2 E:한형준제작 암기와1988-6 F:한형준제작 암기와1988-7
 G:한형준제작 암기와1988-8 H:한형준제작 암기와2008-3 I:한형준제작 암기와2008-4
 J:한형준제작 암기와2008-5 K:한형준제작 암기와 자연건조1 L:제와장제작 암기와 자연건조2
 M:승레문-전기 N:승레문-중기 O:승레문-후기
 P:승레문 수막새-10 Q:승레문 수막새-17 R:제와장제작 시험편-소성
 S:제와장제작 시험편-자연건조 T:원대기와 수막새 U:원대기와 암기와1997
 V:제와장제작 암기와 토런기

<그림 6> 물리적 특성 분석용 기와

3-2. 분석방법

(1) 휨 강도

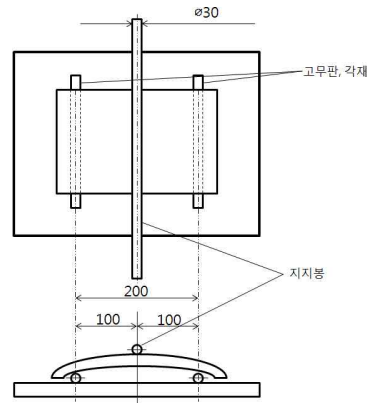
휨 강도는 KS규격 중 점토기와의 규격인 KS F 3510에 준하여 측정하였다⁸⁾. 휨 파괴 하중은 한식 기와와 S형기와 두 가지로 구분 되는데, 본 실험에 사용되는 기와는 한식기와에 해당되므로 한식기와 측정법을 적용하였다. 휨강도는 시험체를 기와의 나비 방향으로 [표 2]와 같은 간격으로 하여 수평 한 시험 받침대에

8) 한국표준협회, <KS 점토기와 규정>(KSF3510), 1997. 11. 12개정, 1970년대 처음으로 기와에 대한 KS규정이 정해지면서 문화재수리공사에 사용되는 기와에 대한 제작표준이 되었다. 따라서 KS규정은 문화재수리공사에 많은 영향을 주었다.

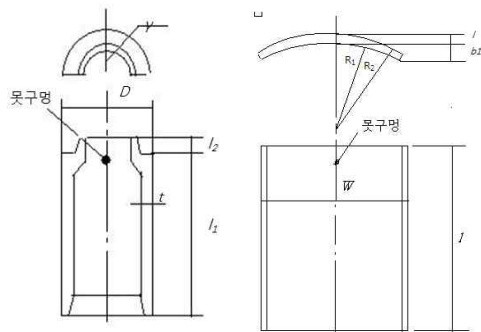
를 놓고, 기와의 표면을 위로해 받침대에 밀착 시켜 놓은 후 기와의 받침대 중앙부에 지지봉을 놓고 균일하게 하중을 가한다. 받침대 및 지지봉의 지름은 약 30mm의 원형 강재로 하며, 하중 속도는 약 49.0N/s로 균일하게 하중을 가해 측정하였다.

[표 2] 휨강도 측정간격단위: mm

분류		받침대 간격(mm)
한식기와	소기와	200
	중기와	230
	대기와	250
S형 기와		200



<그림 7> 휨강도 측정 모식도



<그림 8> 수키와, 암기와 휨강도 측정위치

암키와의 하단부의 곡면 외부 지름(바깥지름 R2)은 기와의 중앙부⁹⁾ 및 상단부의 곡면 상부 지름(안지름 R1)과 같아야 한다. 따라서 암키와의 가로 단면의 중앙부의 두께를 좌우 옆보다 전체를 두껍게 하거나 하단부 끝 부분만 두껍게 한다. 또는 하단부 곡면 중앙을 오그려 내리기로 하거나 하단부 끝 부분 밑면 좌우만을 깎아 낸다.

이 때 시험체를 지지하는 각재와 철판 및 하중을 가하는 중앙의 지지봉이 시험체에 밀착될 수 있도록 하고, 시험체를 수평으로 유지할 수 있도록 하기 위해 적당한 고무판을 각재, 철판, 지지봉 및 시험체 사이에 삽입한다.

(2) 내동해성

내동해성은 기와의 동파에 대한 내성을 알아보기 위한 실험이다. 기와를 20±5℃의 맑은 물속에 24시간 담근 후 꺼내어 -20±3℃의 냉동조에 넣는다. 8시간 이상 경과 후 다시 20±5℃의 맑은 물속에 6시간 이상 담근 후 꺼내어 젖은 형겅으로 물기를 제거하고 시험체의 균열, 유약의 들뜸 유무 등 동결 융해의 관찰 작업을 실시한다¹⁰⁾. 이를 1회로 하여 10회 되풀이하면서 동결 융해에 의한 균열, 박리 등의 결점 발생의 유무를 조사한다. 또한 실험 전 기와의 X선 촬영(X-ray Radiography, Softex-VII Japan)을 실시하였고, 10번의 실험이 끝난 후에도 손상유무를 판단하기 위하여 X선 촬영을 실시한다. 실험 시 기와는 완형이어야 하며, 냉동조 내의 기와 사이 및 냉동조의 벽면과 기와간의 거리는 10cm 이상 띄어 놓아야 한다.

(3) 흡수율

흡수율은 기와시료의 절건 무게와 표건 무

게를 구하여 다음 식에 따라 산출한다¹¹⁾.

$$Q = \frac{m1 - m2}{m2} \times 100$$

- Q : 흡수율(%)
- m1 : 시험체의 표건 무게(g)
- m2 : 시험체의 절건 무게(g)

시험체의 표건 무게는 20±5℃의 맑은 물속에 24시간 담근 후 꺼내어 흡수성이 좋은 천으로 눈에 보이는 물방울을 닦아 낸 뒤 바로 측정했을 때의 무게를 말한다. 시험체의 절건 무게는 105±5℃의 건조기 내에서 24시간 건조한 후 꺼내어 상온까지 냉각했을 때의 무게를 말한다.

(4) 비중

기와 제작 및 소성과정에 의해 생성된 물리적 성질의 차이를 파악하기 위해 비중을 측정하였다. 비중측정은 한국 산업규격 도자기의 흡수율, 부피비중, 겉보기 및 겉보기 공극률 측정방법(KS L4008)을 근거로 하여야 하지만, 이번 실험에서 시료가 유물이라는 점 때문에 이 방법을 택하지 못하였다.

본 실험에서는 시료크기를 규격화(7x7x2cm)한 후 비중 = 질량/부피라는 점을 이용하여 무게를 재어 그 비중을 구하였다.

(5) 전암대자율

전암대자율은 토양광물에 포함된 불투명광물에서 나타나는 강자성 광물인 자철석의 함량을 파악할 수 있는 암석학적 연구방법이다. 기와의 전암대자율은 전암대자율 측정기(ZH Instrument, SM 30)를 사용¹²⁾하였고, 보다 정확한 값을 산출하기 위하여 10회 측정 후 평

11) 한국표준협회, 주8) 앞의 글

12) 김수경, 「천안 백석동 고재미골유적 출토 무문토기의 고고과학적 특성 및 재현실험」, 공주대학교 대학원 석사논문, 2008, p.22

9) 중앙부란 하중을 받는 기와의 중앙 부분(휨 강도 시험에 의해 절단된 부분)을 말한다.

10) 한국표준협회, 주8) 앞의 글

균값을 계산하였다.

(6) 색도

토양의 색은 소성온도, 소성시간, 소성분위 기 및 원료 물질의 화학조성에 영향을 받기 때문에 색도 분석은 토기의 소성환경 및 산지 연구에 유용하다.

토양의 색도 측정을 위해 색차계 측정을 실시하였다. 가장 혼한 색을 나타내는 지점에서 1회 측정하였으며, 1회 측정값은 3번 측정한 평균값에 대한 색도 값을 말한다.

색도계에 의한 색도 분석은 광학적인 기계로 객관적인 수치를 제시하기 위한 측정방법으로 L*, a*, b* 표색계를 선택하여 표시한다. 표색계는 1976년에 국제조명위원회(Commissoin Internationale del' Eclairage, CIE)에서 규격화 되어 사용되고 있다. L*값은 명도가 0~100의 범위를 가지며 50을 기준으로 값이 클수록 흰색을 나타내며, 값이 작을수록 검은색을 나타낸다. 또한 채도를 나타내는 a*, b*값은 -60~60의 범위를 가지며 a*가 (+) 계열일수록 적색, (-) 계열일수록 녹색을 띤다. b*는 (+) 계열일수록 황색, (-) 계열일수록 청색계열을 띤다.

(7) 시차열분석

기와의 소성온도를 추정하기 위해 시차열분석(TG-DTA)을 실시하였으며¹³⁾¹⁴⁾, 분석기기는 TG 1820을 사용하였다. DTA는 표준물질과 시료를 조절된 속도로 가열 또는 냉각시킬 때 시료와 표준물질간의 온도 차이를 측정하여 기록하는 분석법이다. DTA는 분석에서 나타나는 흡열과 발열반응을 통해 광물 내 흡착수, 층간수 및 결정수의 방출, 광물 구조의 붕괴, 용융, 증발, 기화, 자성물질의 상전이뿐만

13) 한민수, 주7) 앞의 글, 2006

14) 장성윤 외 3명, 「영광 군동·마진 원삼국시대 토기와 가마의 제작특성 및 태토의 산지해석」, 보존과학회지, 제25권 제1호, 2009, p.107

아니라 산화와 재결정화 작용 등을 유추할 수 있다.

각 기와들 중 특징적인 기와 편을 선정하여 분석에 이용하였다. 각각의 시료는 최대한 오염이 되지 않도록 분말로 준비하였고, 샘플팬(sample pan)은 알루미나(Al₂O₃)를 사용하였다. 분석 조건은 20℃~1200℃ 사이에서 20℃/min의 승온 속도를 적용하였고, 이를 토대로 분석하였다.

4. 결과 및 고찰

4-1. 휨강도

휨 강도 측정은 만능재료시험기(독일, Instron)를 사용하였고 그 결과를 [표 3]에 나타내었다. 남한산성의 조선 수키와를 제외한 모든 시료가 기와 KS 기준인 2800N 보다 작은 값을 보였다. 단, 수키와는 KS 기준이 제시되어 있지 않지만 임의로 측정해 본 결과, 3034N으로 가장 높은 값을 보였다. 또한 현대 기와도 시중에 알려진 바와 같이 3000N에 다른 값을 보였다. 현대기와는 제작시 진공으로 압축하는 제작방법을 사용하기 때문에 이와 같은 결과를 보인다고 할 수 있다.

[표 3] 휨강도 측정값(N)

구분	시료명	휨강도(N)
1	승례문 암키와1963	2007
2	제와장 1986 제작(No.6)	1762
3	제와장 1988 제작(No.7)	1685
4	제와장 2008 제작(No.4)	1473
5	제와장 2008 제작(No.5)	1784
6	제와장제작 자연건조(No.1)	624
7	제와장제작 자연건조(No.2)	1221
8	남한산성 조선수키와 (No.2)	3034
9	현대기와	2850

* 단, 수키와는 임의로 측정함
KS규격기준에 휨강도는 암키와에 한정함

4-2. 내동해성

시험체의 균열, 유약의 들뜸 유무 등 동결 융해의 관찰 작업을 실시하였다. 측정값을 [표 4]로 나타내었고, 시험체의 변화양상을 <그림 9>부터 <그림 20>에서 볼 수 있다. 현대기와 수막새에서는 2회차 이후에 약간의 균열이 생기기 시작했으며 모든 암키와에서 실험 4회차 이후 표면에 균열이 생겼다. 특히 2008년도 장흥 제와장 제작 기와에서는 표면 박락·박리 현상 또한 나타났다. 그러나 X선 촬영결과 큰 변화를 보이지 않았다. 조선 수키와의 경우 실험 4회차 이후부터 미구 가까이의 등 부위에 균열이 최초 발생되어 점차 심각하게 진행되었으며 X선 사진에서도 내부까지 심한 균열이 진행된 것으로 관찰되었다.

[표 4] 내동해성 측정값

	1~3회	4~5회	6~8회	8~10회
제와장 암키와 1988 (No.8)	동파 없음	표면약간 균열발생	현상 유지	현상 유지
제와장 제작 암키와 2008 (No.3)	동파 없음	표면 박리 박락 최초 발생	표면 박리 박락 범위 증가	표면 박리 박락 범위 증가
송례문 수막새 (No.10)	동파 없음	변화 없음	약간 균열 발생	현상 유지
남한산성-조선수키와 (No.1)	동파 없음	균열 최초 발생	균열 발생	균열이 심함 약간 깨짐
제와장 제작 암키와2009-토런기	동파 없음	표면 박리 박락 최초 발생	약간의 박리 박락	현상 유지
현대 기와 수막새	표면 약간의 균열최초 발생	표면 박리 박락 최초 발생	현상 유지	균열이 약간 깊어짐

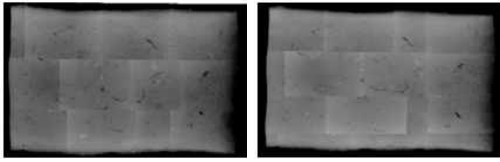
동파에 대한 기와의 강도는 4~8시간 내에는 흡수율에 영향을 받지만 그 이상의 시간에서는 흡수율이 아닌 기공률에 영향을 받았다. 기공률이 높은 기와는 저온으로 갈수록 강도가 급격히 증가하며¹⁵⁾ 기공률이 높다는 것은 비중이 낮다는 것으로 보아도 무방할 것이다.

흡수율은 내동해성에 영향을 미치지만 그 정도가 작은 것으로 나타났다. 이는 석재의 인공풍화실험결과를¹⁶⁾¹⁷⁾ 통해 알 수 있다. 콘크리트의 경우 내부와 외부의 기공이 연결되어 있지 않기 때문에 수분의 동결에 의해서 물의 부피 증가에 따른 영향으로 표면이 박리, 박락, 균열이 일어나 성능이 저하되는 것을 알 수 있다. 하지만 내부와 외부 기공이 연결되어 있는 석재의 경우 기공 내 수분의 동결에 따른 부피가 증가가 표면 미세 균열로 나타나기 때문에 그에 따른 밀도, 비중의 변화가 거의 없었다. 그렇기 때문에 기와의 경우에도 석재와 동일하게 내부와 외부의 기공이 연결이 되어 있어 흡수율이 내동해성에 큰 영향을 끼치지 못하는 것으로 판단된다.

15) 김재현, 「기와의 기계적 성질에 미치는 미세구조의 영향」, 순천대학교 대학원 석사논문, 2000, pp.3~14

16) 김성수, 「인공풍화실험을 이용한 석재의 공학적 내구성 평가」, 석사학위논문, 서울대학교 대학원, 1999

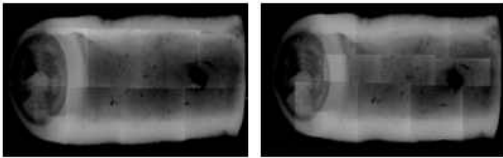
17) 송무근, 「인공풍화를 이용한 암종별 골재의 물성변화에 관한 평가」, 석사학위논문, 서울산업대학교 산업대학원, 2009



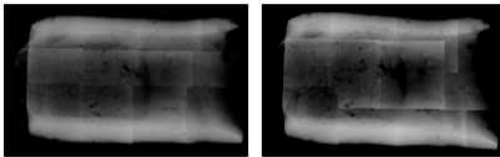
<그림 9> 제와장제작
암키와 1988 (No.8) 실험 전·후



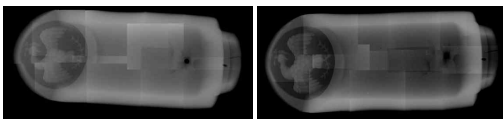
<그림 10> 제와장제작
암키와 2008 (No.3) 실험 전·후



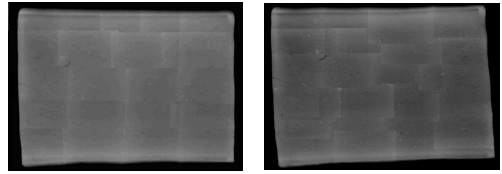
<그림 11> 승례문 수막새 (No.10) 실험 전·후



<그림 12> 남한산성-조선수키와
(No.1) 실험 전·후



<그림 13> 현대기와 수막새 실험 전·후



<그림 14> 제와장 제작 암키와 - 토련기 (2009)
실험 전·후



내동해성 1차



내동해성 4차



내동해성 7차



내동해성 10차

<그림 15> 제와장 제작 암키와 2008 (No.3)



내동해성 1차



내동해성 4차



내동해성 7차



내동해성 10차

<그림 16> 제와장 제작 암키와 1988 (No.8)



내동해성 1차



내동해성 4차



내동해성 7차



내동해성 10차

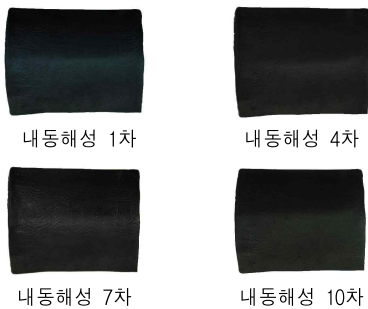
<그림 17> 승례문 숫막새 (No.10)



<그림 18> 남한산성-조선수키와 (No.1)



<그림 19> 현대기와 수막새

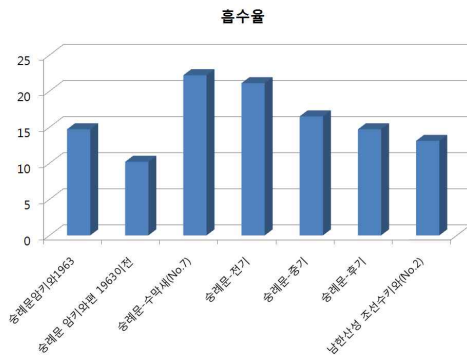


<그림 20> 제와장 제작 암키와-토련기(2009)

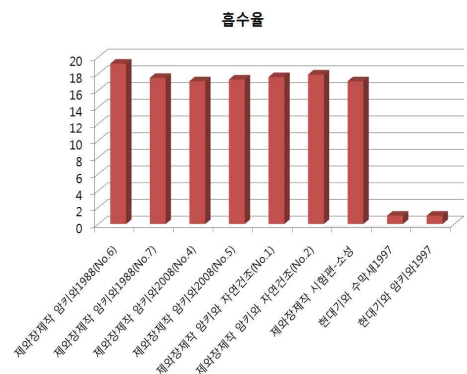
4-3. 비중과 흡수율

각 시기별 기와의 무게비를 알아보기 위하여 비중을 측정하였고 그 결과를 [표 5]에 나타내었다. 측정결과 비중은 대체적으로 유사한 값을 보이지만, 63년에 보수된 승례문 기와가 1.94g/cm³로 가장 낮은 값을 보이고 현대기와

가 3.3 g/cm³로 가장 높은 값을 보였다. 이는 현대기와와 제작시 태토를 토련기로 밀도 높게 교반하기 때문이라고 볼 수 있다. 흡수율은 대체적으로 14~21%의 범위를 보였고, 그 중 현대기와와의 흡수율은 1%로 매우 낮은 결과를 보였다. 이는 전통기와와 제작방법이 태토를 발로 밟는 ‘인발미’ 방식이고, 현대기와는 토련기로 밀도 높게 교반하는 ‘토련기’ 방식이므로 기와 내부의 기공이 많고 적음의 차이를 보인다고 할 수 있다. 또한 제와장 제작기와 중 토련기를 사용하여 제작한 기와는 토련기를 사용하였음에도 불구하고 현대기와와의 흡수율에 비해 6배가량 높은 결과가 나와 다른 제조과정에서도 흡수율에 영향을 끼친다는 것을 알 수 있다.



<그림 21> 전통기와 흡수율 그래프



<그림 22> 제와장 및 현대기와 흡수율 그래프

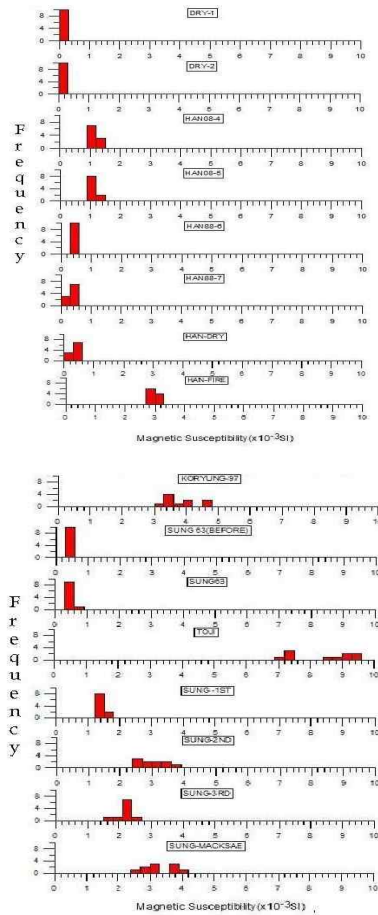
[표 5] 비중 및 흡수율

구분	시료명	전건 질량 (g)	표건 질량 (g)	흡수 율 (%)	비 중 (g/cm ³)
1	승례문암키와 1963	191	219	14.7	1.94
2	승례문 암키와편 1963이전	177	195	10.2	-
3	승례문-수막새(No.7)	176	215	22.2	-
4	승례문-전기	38	46	21.1	-
5	승례문-중기	103	120	16.5	-
6	승례문-후기	245	281	14.7	2.5
7	남한산성 조전수키와 (No.2)	229	259	13.1	2.33
8	제외장제작 시험편-소성	70	82	17.1	-
9	제외장제작 암키와 1988 (No.6)	208	248	19.2	2.12
10	제외장제작 암키와 1988 (No.7)	223	262	17.5	2.27
11	제외장제작 암키와 2008 (No.4)	211	247	17.1	2.1
12	제외장제작 암키와 2008 (No.5)	196	230	17.3	2.02
13	제외장제작 암키와 자연건조 (No.1)	198	233	17.6	2.02
14	제외장제작 암키와 자연건조 (No.2)	201	237	17.9	2.05
15	현대기와 수막새1997	322	325	1	3.3
16	현대기와 암키와1997	326	329	1	3.32

4-4. 전암대자율

기와 태토 내에 존재하는 자성물질의 전암대자율 측정을 통해 기와 제작에 있어 동질성 유무를 판단하였다. 기와의 경우, 태토인 토양 광물이 함유하는 자철석의 함량에 따라 대자율의 차이를 보이며 재질의 동질성 유무를 판단할 수 있는 산지추정의 기초자료가 된다¹⁸⁾. 단, 암석과 달리 기와는 토양을 소성하여 제작하므로 소성 중에 광물상의 변화가 일어난다. 특히 철을 함유한 광물이 고온소성과 냉각과정을 거치면서 대자율은 약간씩 증가한다고 알려져 있으며 태토가 함유한 철 함량과 소성 온도에 따라 차이도 나타날 수 있다. 전암대자율은 보다 정확한 값을 산출하기 위하여 10회

측정 후 평균값을 산정하였다. <그림 23>에서 제외장 제작기와는 0.37~1.12(X10⁻³SI)의 대자율 값을 보였고, 현대기와는 3.54~4.65(X10⁻³SI)의 대자율 값을 보였다. 이 값을 통해 두 기와의 태토 성질 및 기와 생산지가 다르다는 것을 알 수 있다.



<그림 23> 전암대자율 측정값(x10⁻³SI)

또한 승례문 기와 중 시기별(전기, 중기, 후기) 기와의 대자율 값이 차이를 보였다. 이 또한 각 시기별 기와의 생산지가 다르다는 것을 알 수 있다.

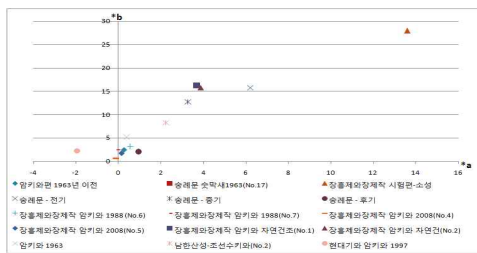
18) 장성운 외 3, 「공주 단지리 유적 출토 백제 기와의 고고과학적 특성」, 보존과학회지, 제22호, 2008, pp.15-30

4-5. 색도

기와의 색도 측정 방법으로 색차계를 사용하였다. 측정은 한 지점에서 측정하였고, 보다 정확한 값을 위해 3번 측정하여 평균값을 산정하였다. <그림 24>, <그림 25>에서 전체적인 명도와 채도는 대부분의 기와가 유사한 영역에 도시되었다.

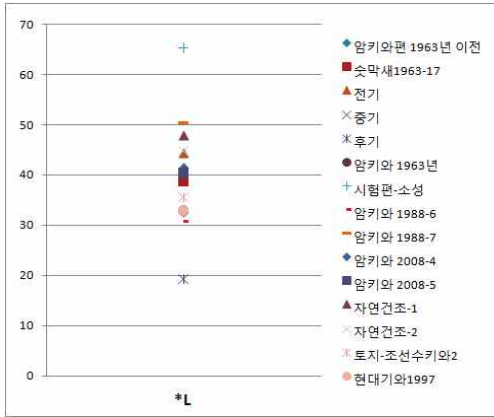
명도 값은 0~100의 범위를 가지며 50을 기준으로 값이 클수록 흰색, 값이 작을수록 검은색을 나타낸다. 승례문 후기 기와 시료는 명도가 가장 낮은 영역으로 20을 나타냈고, 한형준 제작 소성시험편은 가장 높은 영역으로 65에 도시되었다. 이를 제외한 대부분의 기와는 30~50부근으로 대체적으로 검은 계열을 나타내었다.

채도 값은 -60~60의 범위를 가지며 a*가 +계열일수록 적색, -계열일수록 녹색을 띄며, b*는 +일수록 황색, -일수록 청색계열을 띤다. 채도에서는 한형준 제작 소성시험편만 큰 차이를 보였다. 이는 기와 소성 시 연을 먹이지 않은 것으로, 육안관찰 시에도 매우 밝은 색을 띄었다.



<그림 24> 색도 측정 결과(+a, +b)

이 실험은 각 기와의 색도 값을 측정하여 승례문 복구용 기와의 가장 적합한 색을 찾기 위함이었다. 하지만 색도 값은 한 지점을 측정하는 값으로 전통기와와 같이 색이 일정하지 않은 기와에 대해서는 결과를 도출하기가 어려웠다.

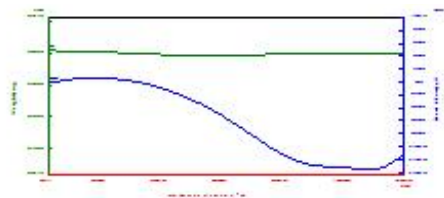


<그림 25> 명도 측정 결과(*L)

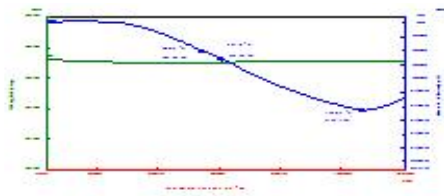
4-6. 시차열분석

기와의 소성온도를 규명하기 위해 시차열분석(TG-DTA)을 실시하였다. 모든 기와에서 550℃~573℃ 부근의 흡열 피크가 확인되었다.(그림 26~그림 37)

이것은 석영이 α→β로 상전이 함에 따라 나타나는 피크이다¹⁹⁾²⁰⁾. 모든 기와는 1,000℃ 이상의 온도에서 소성되었을 것이라 추정된다.



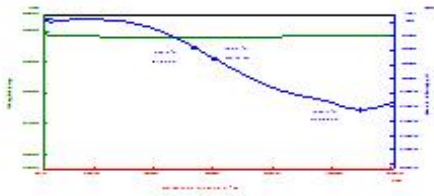
<그림 26> 승례문 암기와 1963이전



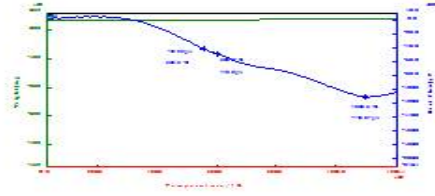
<그림 27> 승례문-전기

19) 한민수, 주2) 앞의 글, 2006

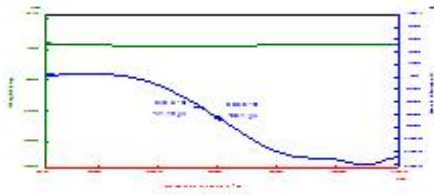
20) 장성윤 외 3, 주16) 앞의 글, 2008



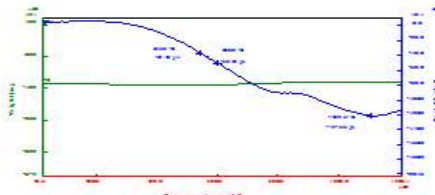
<그림 28> 승례문-중기



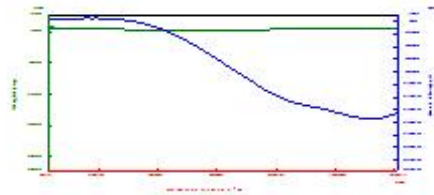
<그림 33> 장흥 제와장제작 암키와 2008-4



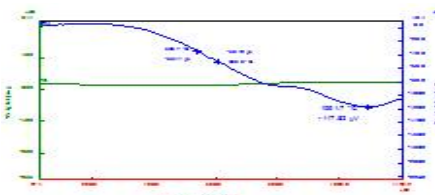
<그림 29> 승례문-후기



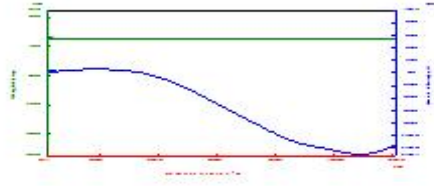
<그림 34> 장흥 제와장제작 암키와 1988-6



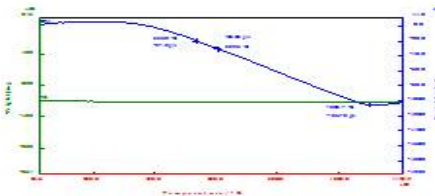
<그림 30> 승례문 암키와 1963



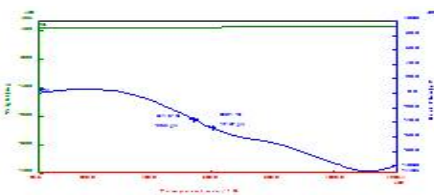
<그림 35> 장흥 제와장제작 암키와 1988-7



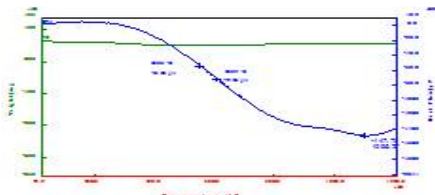
<그림 31> 현대기와



<그림 36> 장흥 제와장제작 시험편-소성



<그림 32> 장흥 제와장제작 암키와 2008-5



<그림 37> 남한산성-조선수키와2

4-7. X선 회절분석(XRD)

장흥 태토, 장흥 제외장기와 승례문기와, 남한산성기와, 현대기와 등의 XRD 분석결과는 [표 6], [표 7], [표 8]과 같다.

장흥 제외장기와의 구성광물은 한 시료를 제외하고는 석영(quartz), 정장석(orthoclase), 미사정석(microcline)만이 산출된다. 이는 태토를 가열하여 굽는 과정에서 태토의 광물들이 모두 변질되었기 때문이다.

승례문기와의 구성광물은 석영과 미사장석 그리고 2차 변질광물인 물라이트(mullite), 헤르시나이트(hercynite) 이고 이외에 사장석, 정장석, 흑운모, 백운모, 적철석, 각섬석 등이 측정된다. 반면에 남한산성 기와에서는 흑운모, 백운모, 미사장석 등이 관찰되지 않는다. 이는 두 기와의 기원물질과 굽는 과정이 다를 수 있음을 시사해주는 것이다.

기와의 광물조성에서 물라이트, 헤르시나이트, 크리스토팔라이트(cristobalite) 등과 같은 광물들이 나오는 것은 1,000℃ 이상의 온도에서 기와가 소성되었다는 것을 알 수 있다. 그 중 승례문기와(1963년 암키와)는 고열 변성광물인 크리스토팔라이트²¹⁾가 확인됨으로서 1,200℃ 이상에서 소성된 것으로 판단된다.

[표 6] 장흥지역 논흙 및 각종 태토 수비흙의 XRD 분석결과

구분	백색점토	논흙 No.1 Paddy clay	논흙 No.2 Paddy clay	논흙 No.3 Paddy clay	기와태토	1차수비	2차수비	누린질	검은질
석영	●	●	●	●	●	●	●	●	●
백운모	●	●	●	●	●	●	●	●	●
정장석	●	●	●	●	●	●	●	●	●
사장석		●	●	●	●	●	●	●	●
녹리석			●	●	●	●	●	●	●
녹염석								●	
카오리나이트	●	●	●	●	●	●	●	●	
일라이트	●	●	●	●	●	●	●	●	

[표 7] 장흥지역 기와의 XRD 분석결과

구분	소성	자연조	장흥기와 No.1	장흥기와 No.2	장흥기와 No.3	장흥기와 No.4	장흥기와 No.5
석영	●	●	●	●	●	●	●
백운모	●	●					
정장석	●	●	●	●	●	●	●
미사장석		●	●	●	●	●	●
사장석		●				●	
녹리석		●					
카오리나이트		●					
일라이트		●					
각섬석	●	●					

[표 8] 승례문기와, 남한산성기와, 현대기와의 XRD 분석결과

구분	현대기와	승례문암키와	승례문숫키와				승례문고기와	조선기와			
			No. 11 숫막새	No. 12 숫막새	No. 13 숫막새	No. 14 숫막새		No. 3	No. 4	No. 5	No. 6
석영	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
흑운모			●			●					
백운모						●					
정장석							●		●		
미사장석		●	●	●	●						
사장석	●		●		●				●		
물라이트	●	●				●			●	●	●
적철석	●										
헤르시나이트		●		●	●			●		●	●
크리스토팔라이트		●									
각섬석							●	●			●

5. 결론

국내에서는 기와의 물리적 특성에 대한 연구가 미비하고 관련 자료가 부족하여 실험에 어려움이 있었지만, 승례문 및 이와 관련된 기

21) 크리스토팔라이트(cristobalite)는 1,200℃ ~ 1,300℃에 생성되는 광물이다.

와의 물리적 분석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

휨강도는 1963년에 제작된 승레문 암키와가 2007N으로 우수성을 보였으며, 현대기와 역시 3000N에 달하는 값을 보이거나 제와장이 제작한 기와는 1600N 내외로 나타났다. 이는 현대기와와의 제조 공정 중에 진공으로 압축하는 방법으로 강도를 높이기 때문에 이러한 결과가 나타난 것으로 보인다.

내동해성은 승레문의 암키와와 제와장이 제작한 기와는 1~3회 까지 동파가 없었으나 4~5회 부터 표면의 균열과 박락이 나타났다. 이에 반해 현대기와에서도 1~3회 부터 약간의 균열이 생기기 시작하였다. 일반적으로 전통기와가 동파에 약하다고 알려져 있으나 현대기와에 비하여 큰 차이는 없는 것으로 보인다.

흡수율은 제와장이 제작한 기와가 가장 높고 그 다음 승레문기와, 그리고 현대기와가 1%로 가장 낮았다.

비중은 승레문기와는 2.5 g/cm³, 제와장 기와는 2.12 g/cm³, 현대기와는 3.3 g/cm³로 전통기와에 비하여 상대적으로 현대기와의 비중이 큰 것을 볼 수 있다. 전통기의 제작은 사람이 점토를 발로 밟아 혼합하는 '인발미' 형식이고 현대기와는 점토를 진공으로 압축하는 방법을 사용하여 제작하는 형식이기 때문에 휨강도와 비중이 상대적으로 크게 나타났다.

전암대자율의 차이는 제와장 제작기와가 0.37~1.12(X10-3SI) 값을 나타내었고, 현대기와가 3.54~4.65(X10-3SI)의 값을 나타내어 생산지가 다르다는 것을 알 수 있었다. 그리고 승레문 기와 사이에도 전기, 중기, 후기 기와의 대자율 값의 차이를 읽을 수 있어 각 시기별로 기와의 생산지가 다를 가능성을 유추할 수 있다.

시차열분석에서 기와는 550~573℃ 부근에서 흡열 피크를 확인할 수 있었다. 이를 토대로 모든 기와의 소성온도는 1,000℃ 이상으로 볼 수 있다.

1963년 보수에 사용된 승레문 암키와의 경우 X선 회절분석에서 크리스토팔라이트(cristobalite)라는 광물조성이 확인되었다. 이 광물은 1,200℃~1300℃ 사이에서 생성되는 광물이므로 암키와는 대략 1,200℃ 이상에서 소성된 것으로 보인다.

연구결과를 종합하면, 승레문 기와는 동파에 매우 강하고, 강도가 강하면서도 비중이 낮아 목부재에 가해지는 하중이 비교적 적으며, 기공이 많이 발달해 있어 흡수율이 높아 통기성이 좋다. 하지만 시기별로 비교적 기와의 지역과 태토의 성분이 각각 다른 것으로 밝혀져 규격화하기 어려운 단점이 있다.

제와장 제작기와는 휨강도는 제일 약하나 동파에 강하고 비중이 낮아 목부재에 가하는 하중이 비교적 적으며 상대적으로 기공이 많이 발달해 있어 흡수율이 높고 통기성이 좋다. 모의실험의 일환으로 토런기를 사용하여 제작한 기와는 토런기를 사용하였음에도 현대기와의 흡수율에 비해 6배 가량 높은 결과가 나와 다른 제조공정에서도 흡수율에 영향을 끼친다는 것을 알 수 있다.

이에 비해 현대식 기와는 진공 압착 성형과정으로 휨강도가 매우 강하나 비중이 높아 기와의 무게가 무거워져 목부재에 가해지는 하중이 증가해 구조적 불안정을 가져올 수 있다.

여러 실험 결과, 현대기와 보다 전통기와에서 승레문 기와와 유사한 점을 다수 찾을 수 있었으나, 승레문에 사용된 기와에 비해 부족한 점이 있기 때문에 건축문화재의 보수·복원 현장에 활용하기 위해서는 차후 제작방식의 보완 연구가 이루어져야 한다.

<참고문헌>

1. 국립문화재연구소, 「송례문 화재 피해현황 및 수습보고서」, 송례문, 국립문화재연구소, 2008, pp.13~15
2. 김왕직·김석순, 「기와의 보존과 활용」 건축, Vol. 49, No. 12, 대한건축학회, 2005
3. 김성구, 『옛기와』, 대원사, 1992
4. 최맹식, 「朝鮮時代 기와製作」, 고궁 건물막새 등 문양조사, 문화재청, 2000
5. 양동윤·김주룡·한창균, 「고구려 기와의 화학분석과 강도측정을 통한 제작기법 고찰」, 고구려연구, Vol. 9, 2000, pp.13~16
6. 고민정·김규호, 「경기도 포천시 길명리 가마터 출토 흑유자기와 백자에 대한 특성분석」, 보존과학회지, Vol. 22, 2008, p.47
7. 한민수, 「해저인양 고려청자의 산지추정에 관한 과학적 기법연구」, 중앙대학교 대학원 박사학위논문, 2006
8. 정광용·김명진, 「중성자 방사화 분석에 의한 고려후기 기와의 산지 연구」, 한국분석과학회, Vol. 14, 2001, pp.476~477
9. 김수경, 「천안 백석동 고재미골유적 출토 무문토기의 고고과학적 특성 및 재현실험」, 공주대학교 대학원 석사논문, 2008, p.22
10. 장성운 外 3, 「공주 단지리 유적 출토 백제 기와의 고고과학적 특성」, 보존과학회지22, 2008, pp.15~30
11. 김재현, 「기와의 기계적 성질에 미치는 미세구조의 영향」, 순천대학교 대학원 석사논문, 2000, pp.3~14
12. 김성수, 「인공풍화실험을 이용한 석재의 공학적 내구성 평가」, 석사학위논문, 서울대학교 대학원, 1999
13. 송무근, 「인공풍화를 이용한 암종별 골재의 물성변화에 관한 평가」, 석사학위논문, 서울산업대학교 산업대학원, 2009
14. 장성운 外 3, 「공주 단지리 유적 출토 건축역사연구 제20권 1호 통권74호 2011년 2월 백제 기와의 고고과학적 특성」, 보존과학회지, 제22호, 2008, pp.15~30

접수(2010. 9. 29)

수정(1차: 2010. 12. 13, 2차: 2010. 12. 26,

3차: 2010. 12. 28)

게재확정(2010. 12. 31)

A Study of the Physical Properties of Sungnyemun Tile

Chung, Kwang-Yong

(Dept. of Conservation Science, The National University of Cultural Heritage)

Abstract

The Sungnyemun roofing tiles were twice disassembled for maintenance work, in 1963 and 1997, and modern tiles were applied in 1997. However, besides differing in visual appearance, the modern tiles had distinctly different physical properties. A study has been carried out on 22 different tiles, including original Sungnyemun tiles, modern tiles applied during maintenance, traditional tiles made by tile-makers, and others, to examine their physical properties, such as bending strength, frost resistance, absorption, whole-rock magnetic susceptibility, chromaticity, differential thermal analysis, and other characteristics.

Since the method of making modern tiles involves compressing clay in a vacuum, modern tiles showed relatively greater bending strength and specific gravity, while Sungnyemun tiles and those made by tile-makers, in comparison, demonstrated less bending strength and specific gravity owing to their production method of 'treading,' in which clay is mixed by having someone tread upon it repeatedly. Over time, the absorption rate of the original tile used for Sungnyemun gradually decreased from 21% to 14.7%; traditional tiles from tile-makers showed absorption rates of 17%, while the absorption rate of modern tiles was just 1%, which is significantly low. As for frost resistance, Sungnyemun tiles and traditional tiles from tile-makers showed cracking and exfoliation after being subjected to testing 4 or 5 times, while slight cracking was seen on the surface for modern tiles after 1ngy, or 3 times. In other words, no significant difference from influence by frost was found. According to the results of differential thermal analysis, the plastic temperature was shown to have been no less than 1, on^oC for all types of tile, and cristobalite was measured through XRD analysis from a Sungnyemun female tile applied during maintenance in 1963, which appeared to have been plasticized at between 1,200^oC~1,300^oC.

Based on these research results on the physical properties of tiles from the Sungnyemun roof, a fundamental production method for tiles to be applied in the restoration of Sungnyemun has been identified.

Keywords : Traditional tile, Sungnyemun tile, Frost resistance, Absorption rate, Plastic temperature, Physical properties