

## Compositional and microstructural analyses of grayish-blue-powdered celadon in Yeongseo Region in Gangwon-do: by Wonju Beopcheon-temple site

Byoung-Hoon Lee<sup>1</sup> and Myoung-Gi So<sup>2</sup>★

<sup>1</sup>Kangwon Research Institute of Cultural Heritage, Chuncheon, 200-150, Korea

<sup>2</sup>Department of Nano Applied Engineering, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea

(Received March 29, 2013; Revised May 17, 2013; Accepted June 4, 2013)

### 강원도 영서지역 출토 분청사기의 조성 및 미세구조 분석: 原州 法泉寺址를 중심으로

이병훈<sup>1</sup> · 소명기<sup>2</sup> ★

<sup>1</sup>(재)강원문화재연구소, <sup>2</sup>강원대학교 나노응용공학과  
(2013. 3. 29. 접수, 2013. 5. 17. 수정, 2013. 6. 4. 승인)

**Abstract:** This research aims to examine compositional and microstructural properties of grayish-blue-powdered celadon in Wonju Beopcheon-temple site. X-ray fluorescence sequential spectroscopy (XRF) with micro-point analysis, scanning electron microscopy (SEM) with energy dispersive spectroscopy (EDS) and X-ray diffraction (XRD) were applied to determine the chemical composition, microstructure and crystallinity of samples, respectively. As a result, the average compositions of bodies were low silica (RO<sub>2</sub>) and high flux (RO+R<sub>2</sub>O). Owing to the high content of calcium oxide the glaze is considered lime type between lime-alkali type. The body of celdon sheard was found quarts, mullite, microcline, albite. Especially, the body's chemical compositions were compared to the results of previous studies by using a Seger formula. The compositional properties of Grayish-blue-powdered celadon in Wonju Beopcheon-temple site showed differently from the the other grayish-blue-powdered celadon.

**요 약:** 본 연구는 원주 범천사에서 출토된 분청사기의 화학조성과 미세조직, 결정상을 X-선형광분석기와 주사전자현미경-에너지분산형엑스선분석기, X-선회절분석기를 이용하여 알아보았다. 태토의 화학성분 분석 결과, 낮은 실리카(RO<sub>2</sub>) 함량과 높은 용제(RO+R<sub>2</sub>O) 함량임을 알 수 있다. 유약의 경우 용제 성분 중 CaO 함량이 높은 전형적인 석회계열(lime type)과 석회-알칼리 계열(lime-alkali type) 유약을 사용하였으며 태토의 결정상으로는 quarts, mullite, microcline, albite가 확인되었다. 특히 원주 범천사에서 출토된 분청사기 태토의 화학적 조성은 제겔식을 이용하여 이미 연구된 다른 유적에서 출토된 분청사기와 비교하였으며 화학조성은 서로 상이한 결과를 보였다.

Key words: grayish-blue-powdered celadon, inlay, XRD, SEM, mullite

★ Corresponding author

Phone : +82-(0)33-250-6265 Fax : +82-(0)33-250-6260

E-mail : [mgso@kangwon.ac.kr](mailto:mgso@kangwon.ac.kr)




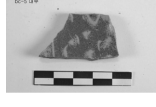

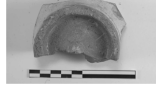


## 1. 서 론

한국 고대 도자기에 대한 과학적 연구는 국내외적으로 분석기기의 발달로 활발히 진행되고 있으며 주된 연구는 제작기법의 규명, 산지의 추정, 제작시기의 추정 등을 목적으로 이루어지고 있다.<sup>1</sup>

도자기의 제작기법 연구 방법으로 태토 및 유약의 화학조성은 X-선형광분석기(XRF), 주사전자현미경(SEM)과 에너지분산형엑스선분석기(EDS)등을 이용한 미세구조, X-선회절분석기(XRD)등을 통한 결정상, 열중량분석기(TGA)과 시차열분석기(DTA)를 이용한 소

성온도가 중심이 되고 있다. 그 밖에 산지의 추정을 위해서는 중성자방사화분석기(NAA; Neutron Activation Analysis)과 유도결합플라즈마 원자방출분광기(ICP-AES; Inductive Conductive Plasma-Atomic Emission Spectrometer), 유도결합플라즈마 질량분석기(ICP-MS; Inductive Conductive Plasma-Mass Spectrometer)를 이용하여 미량원소 분석을 통해 이루어지고 있다.<sup>1</sup> 이와 같이 한국고대도자기에 대한 당시의 도자 생산문화를 고고학적 또는 예술적 측면에서의 연구와 더불어 과학적으로 규명하려는 노력이 점진적으로 진행되고 있다.

Table 1. Classification of samples in Beopcheon-temple site

Sample name	Decoration	Glaze		Thickness (mm)	Picture of sample
		Color	Crackleware		
bc1	inlaid	BL-GN	○	5.35-7.25	
bc2	inlaid	BN-GY	○	4.40-4.55	
bc3	inlaid	GY-GN	○	4.25-5.15	
bc4	inlaid	GY-BL	○	4.15-4.30	
bc5	inlaid	BE-BN	×	5.20-5.35	
bc6	inlaid	BE-WH	×	32.95-34.55	
bc7	inlaid	GY-BL	○	4.60-4.70	
bc8	inlaid	GN-BE	×	17.55-18.80	

\*Color : GY; gray WH; white BL; blue GN; green BE; beige BN; brown

이미 분석이 진행된 유물로는 도자기 생산지의 중심이었던 한강수계의 경기도 광주분원과 고려청자 요지(窯址)인 전남 강진, 전북 부안 일대를 중심으로 많은 연구가 이루어 졌다.<sup>7</sup> 그러나 강원도 일대는 다른 지역에 비해 고대 도자기 연구가 미비하며 특히 고려청자, 조선백자의 과학적 연구에 비해 분청사기에 대한 연구는 더욱 미비한 실정이다.

본 연구에서는 강원도 영서지역의 대표적인 사지(寺址)인 법천사지 출토 분청사기 시편 8 개를 선정하여 화학조성 및 광물의 결정상, 미세구조 등을 분석하였고, 이미 연구되었던 강원도 영동지역의 강릉 보광리 분청사기<sup>9</sup>와 한강수계인 경기도 광주분원의 분청사기,<sup>11</sup> 공주 학봉리,<sup>11</sup> 광주 충효동,<sup>10</sup> 보은 적암리,<sup>12</sup> 전북 부안 우동리<sup>12</sup>출토 분청사기와 원주 법천사지 분청사기의 화학조성을 제겔식으로 비교하였다.

## 2. 실험

### 2.1. 분석 시편

본 연구에서 대상으로 한 시편은 원주 법천사지 5차 발굴에서 출토된 분청사기 8편이며, 분청사기 도편은 현재 노출되어 있는 부도전지, 석축 주변, 문지 및 계단지, 건물지 등에 매장되어 있던 분청사기 시편을 수습·선별하여 시행하였다. 또한 대상 시편에 대한 상감 문양(decoration), 유약(glaze)의 색(color)과 빙렬(crackleware)여부, 두께(thickness)를 Table 1에 나타내었다.

### 2.2. 분석 방법

#### 2.2.1. 화학조성

법천사지 출토 분청사기의 화학조성은 X-선형광분석기(XRF; ZSX100e, Rigaku, Japan)를 이용하여 분석하였으며, 엑스선 선원은 Rh target을 사용하였다. 태토(body) 부분의 화학적 조성을 조사하기 위하여 유약(glaze), 상감(inlay) 부분을 제거한 후 agate mortar에서 약 30  $\mu\text{m}$ 로 분쇄하였다. 분쇄된 시료를  $\varnothing$  30 mm 펠렛 형태로 성형하여 분석용 시편으로 사용하였으며 성형 압력은 20 ton으로 하였다. 유약 및 상감부분의 미세 구역에 대한 화학 조성을 비교하기 위하여 XRF에 내장되어 있는 CCD camera를 이용하여 시편의 image를 얻은 후 0.5 mm diameter micro area로 mapping하여 유약 및 상감 부분을 분석하였다.

#### 2.2.2. 미세구조

법천사지 출토 분청사기의 유약, 태토, 상감 부분의 미세구조와 각각의 화학적 조성을 조사하기 위하여 주사전자현미경(SEM; JSM-6300, JEOL, Japan)과 에너지분산형엑스선분석기(EDS; ISIS-300, OXFORD, England)를 이용하여 조사하였다. 유약, 태토 및 상감 부분이 적절히 나타나는 부분을 선택하여 이차전자 이미지(secondary electron image)를  $\times 40$ ,  $\times 500$ 으로 관찰하였으며, 화학적 조성에 대한 이미지를 얻기 위하여 원자번호 효과가 큰 반사전자 이미지(backscatter electron image)의 조성상(COMPO mode)을  $\times 40$ ,  $\times 500$ 으로 관찰하였다. 또한 EDS를 이용하여 화학적 조성에 따른 X-ray plane mapping을  $\times 40$ ,  $\times 500$ 으로 관찰하였다. 시편의 준비는 미세절단기를 이용하여 두께 3 mm로 절단하고 시편의 미세연마를 위하여 미세연마기에서 SiC paper #220, #500, #1,000, #2,400의 순서로 연마한 후 image 관찰과 EDS 분석을 위하여 carbon coating하였다.

### 2.2.3. 결정상

법천사지 출토 분청사기의 결정상조사는 고분해능 X-선회절분석기(HR-XRD; D/MAX 2500V/PC, Rigaku, Japan)를 이용하여 분석하였다. 이때 분석조건은 scan range;  $5^{\circ}$ - $80^{\circ}$ , scan speed;  $4^{\circ}/\text{min}$ , scan step;  $0.01^{\circ}$ , acceleration voltage; 40 kV, 100 mA, target; Cu로 하였다. 시료의 준비는 분청사기 파편으로부터 미세절단기를 이용하여 적당량을 절단한 후, agate mortar를 이용하여 약 30  $\mu\text{m}$  이하로 분쇄하여 사용하였다. 분석은 XRD용 glass sample holder (0.5 mm)에 시료를 Bragg's law ( $n\lambda = 2d\sin\theta$ )을 만족하도록 측정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 화학조성

#### 3.1.1. 유약(glaze)

분청사기 유약의 화학조성은 시편 한개 마다 2 point씩 Micro mapping에 의해 분석하였다(Fig. 1). 분석 결과는 Table 2와 같이 유약과 상감 파트별 평균값으로 나타내었다. 유약의 성분에는 큰 차이가 관찰되지 않았으며, 용융제 성분 중 CaO 함량이 12.90~16.52 wt%로서 석회(lime)를 주 용융제로 하는 석회 계열(lime type)이나 석회-알칼리 계열(lime-alkali type)임을 알 수 있다.  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 는 bc5의 경우 다른 시편에 비해 1-2 wt% 더 함유되어 유약의 색이 더 푸르게 나타나는 데 영향을 미친 것으로 보인다.<sup>14</sup> 또한 bc1, bc3, bc6

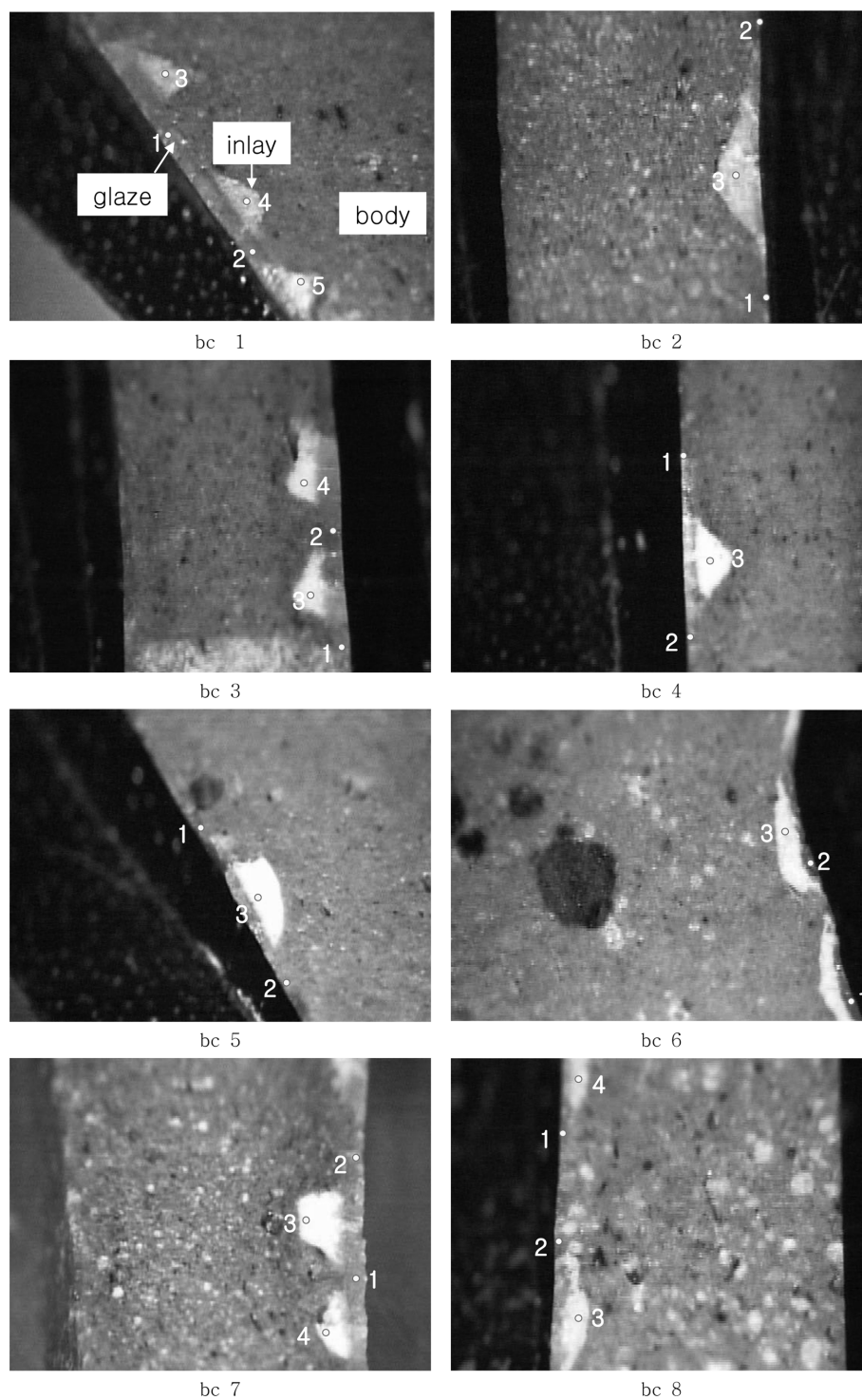


Fig. 1. CCD camera image in XRF and micro-point analysis of glaze, inlay for the samples (bc1-bc8). point 1, 2: glaze, point 3,4,5: inlay.

의 시편에서 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 성분이 검출되었는데 이는 유약 제조 시 유기질 재를 첨가하여 사용하였기 때문이다.<sup>15</sup>

분청사기 제작 시 CaO, K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O가 중요한 용제로 사용되며 본 연구 시편들의 경우 Na<sub>2</sub>O는 미량 검출되고 K<sub>2</sub>O는 4.65-6.15 wt% 함유되어 있음을 알 수 있다. 이는 CaO 함유량이 높은 전형적인 석회계열(lime type) 유약에서 K<sub>2</sub>O와 Na<sub>2</sub>O 함량이 증가하고 CaO 함량이 감소하는 석회-알칼리 계열(lime-alkali type) 유약으로 변천되는 과정의 분청사기임을 알 수 있다.<sup>5</sup>

3.1.2. 상감(inlay)

Micro mapping에 의해 분석된 분청사기 상감의 화학조성을 시편 한 개 마다 1-3 point씩 측정 하였다 (Fig. 1). bc1-bc8 시편의 상감에 대한 화학조성 분석 결과, 유약 층보다 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 K<sub>2</sub>O의 함량이 높게 나타났다. 특히 bc2, bc5, bc6의 시편이 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 높게 나타나는데 bc2 시편은 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 28.30 wt%이고 bc5 시편의 경우 37.00 wt%이며, bc6 시편은 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 함량이 36.70 wt%로 매우 높게 나타난다(Table 2). 분청사기의 상감 부분은 유약이 용융할 때도 밝은 색의 성분을 유지하면서 변화하지 않았고 특히 bc5 및 bc6의 시편이 백색 상감을 유지할 수 있었던 이유는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 함유량

Table 2. Composition of micro-areas in glaze, inlay measured by XRF (wt.%)

Sample	Point		SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
bc1	1-2	Glaze	61.40	16.75	1.49	14.53	·	5.08	·	·	0.25
	3-5	Inlay	61.43	23.57	2.38	6.32	·	6.21	·	·	·
bc2	1-2	Glaze	58.90	16.40	1.28	16.52	1.10	5.02	0.71	·	·
	3	Inlay	55.70	28.30	1.57	3.19	·	9.02	2.08	·	·
bc3	1-2	Glaze	61.00	16.50	2.06	13.6	0.70	5.81	·	·	0.23
	3-4	Inlay	63.30	24.95	2.79	1.71	0.99	6.20	·	·	·
bc4	1-2	Glaze	58.95	19.60	2.01	14.60	·	4.65	·	·	·
	3	Inlay	69.60	21.60	1.48	1.83	·	5.45	·	·	·
bc5	1-2	Glaze	55.50	21.90	3.17	14.10	·	5.04	·	·	·
	3	Inlay	51.70	37.00	1.68	3.56	·	6.02	·	·	·
bc6	1-2	Glaze	54.90	20.40	2.09	15.35	·	5.17	1.50	·	0.54
	3	Inlay	47.90	36.70	1.85	5.40	·	5.71	1.89	·	0.52
bc7	1-2	Glaze	58.85	18.30	2.01	14.25	1.19	5.34	·	·	·
	3-4	Inlay	67.70	22.80	2.08	1.23	·	6.12	·	·	·
bc8	1-2	Glaze	59.90	19.05	1.79	12.90	·	6.15	·	·	·
	3-4	Inlay	64.80	22.30	1.92	4.56	·	6.32	·	·	·

Table 3. Composition of samples's body measured by XRF

Sample number	Oxide Concentration (wt.%)										
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Total
bc 1	64.50	21.70	4.32	1.25	0.99	0.99	4.59	1.15	0.05	0.05	99.60
bc 2	65.60	21.10	4.23	1.11	0.98	0.89	4.88	0.81	0.06	0.06	99.71
bc 3	65.10	21.50	4.15	1.21	0.95	0.98	4.70	1.01	0.05	0.06	99.71
bc 4	66.90	21.50	2.11	1.20	0.94	1.37	4.54	0.99	0.04	0.07	99.65
bc 5	69.50	20.10	1.55	0.66	0.84	1.64	4.50	0.92	0.04	0.04	99.78
bc 6	66.00	20.70	4.19	0.94	0.93	1.44	4.53	0.95	0.05	0.06	99.79
bc 7	67.80	21.60	2.03	1.04	0.89	0.67	4.84	0.92	0.03	0.05	99.87
bc 8	69.70	18.50	2.21	0.89	0.59	0.92	6.06	0.77	0.02	0.05	99.70
Average	66.89	20.84	3.10	1.04	0.89	1.11	4.83	0.94	0.04	0.05	99.73
Standard deviation	1.96	1.09	1.22	0.20	0.13	0.33	0.52	0.12	0.01	0.01	0.08

이 높았기 때문으로 생각된다.<sup>13</sup>

### 3.1.3. 태토(body)

태토만을 따로 분쇄하여 지름 30 mm 펠렛으로 제작 후 분석한 결과를 Table 3에 나타냈다. bc1-bc7 시편의 SiO<sub>2</sub>와 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>은 64.50-69.50 및 20.10-21.70 wt%이며, bc8 시편은 SiO<sub>2</sub>와 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 69.70 및 18.50 wt%로 확인되었다. Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, MnO를 살펴보면 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 bc1-bc3 및 bc6의 시편이 4.15-4.32 wt%인데 반해 bc4, bc5, bc7, bc8의 시편은 1.55-2.21 wt%로 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 함유량이 작아 비교적 밝은 색을 띠고 있다. TiO<sub>2</sub>는 0.77-1.15 wt%로서 거의 비슷하며 MnO는 미량 첨가되었음을 확인할 수 있었다. 또한 Na<sub>2</sub>O와 K<sub>2</sub>O의 함량이 0.67-1.64 및 4.50-6.06 wt%로서 비교적 높은 함량을 나타내고 있는데, 이는 용제로서 알칼리 장석을 사용하였다는 것을 증명해 준다.

Fig. 1의 bc6 사진에서 어두운 색을 나타내는 큰 입자를 볼 수 있는데 이는 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 많이 함유된 입자이다. 태토의 색은 성분 중 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, MnO에 의해 결정되는데 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 발색에 직접적인 역할을 하며 TiO<sub>2</sub>는 독자적으로 착색제 역할을 하지 못하고 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 결합하여 황색화 하는 경향이 있다.<sup>2</sup> bc1의 착색산화물인 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 bc2-8 시편보다 많이 함유되어 있으나 TiO<sub>2</sub>, MnO는 미량 함유되어 있어 태토의 발색에 영향을 미치지 못하였다.

### 3.1.4. 태토(body)의 제겔식(Seger formula)

일반적으로 도자기 원료는 산화물 또는 몇 개의 산화물이 결합된 화합물로 구성되어 있으며, 이들 산화물은 염기성에 속하는 금속산화물과 산성에 속하는 비금속산화물, 산성과 염기성의 중간인 중성산화물로 나눌 수 있다. 이 중에서 중성산화물은 산성과 염기성 산화물이 공존할 경우 쉽게 반응하여 생성됨으로 원료의 분류를 이용한 비교분석에서는 크게 산성과 염기성으로 나눈다. 이렇게 분류된 주요 산화물을 가지고 산소 이외의 원소를 R로 치환하면 염기성에 대한 일반식은 RO 또는 R<sub>2</sub>O가 되고, 중성은 R<sub>2</sub>O<sub>3</sub>로, 산성은 RO<sub>2</sub>로 표현하는데 이를 이용한 것이 제겔식이다. 제겔식의 태토 분석 결과는 R<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 1 mole로 하였을 때 RO<sub>2</sub>와 RO+R<sub>2</sub>O의 몰(mole)비를 구하는데 RO<sub>2</sub>는 SiO<sub>2</sub>와 TiO<sub>2</sub>와 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>의 합을 나타내며, R<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 합을 나타내고 RO는 MgO, CaO, MnO의 합이며 R<sub>2</sub>O는 Na<sub>2</sub>O와 K<sub>2</sub>O의 합이다.<sup>3</sup>

원주 법천사지 출토 분청사기의 특성을 조사하기 위

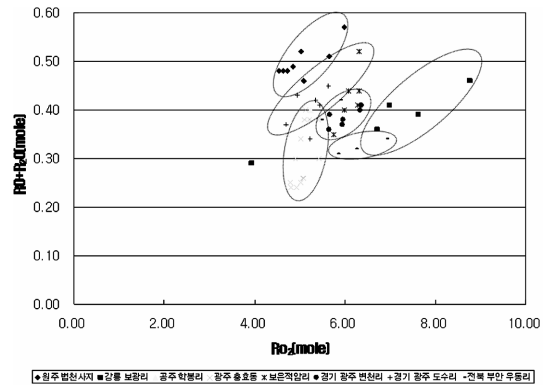


Fig. 2. Distribution of samples' body composition according to Seger formula.

하여 다른 지역에서 출토된 분청사기들과 비교해 보았다. 영서지역에 위치한 원주 법천사지 출토 분청사기는 영동지역인 강릉 보광리에서 출토된 분청사기와 분포상에 확실한 차이를 나타내는데, 이는 영동지역과 영서지역의 분청사기 태토의 화학조성에 차이가 있다는 것을 증명한다. 또한 원주 법천사지 출토 분청사기는 강릉 보광리, 공주 학봉리, 광주 충효동, 보은 적암리, 경기 광주 변천리, 도수리, 전북 부안 우동리 등에서 출토된 분청사기보다 RO<sub>2</sub>는 낮게 나타나고 RO+R<sub>2</sub>O이 상대적으로 높게 나타나는데 이는 RO<sub>2</sub>의 값에 영향을 미치는 SiO<sub>2</sub>의 함량이 다른 지역의 분청사기보다 적음을 알 수 있으며, RO+R<sub>2</sub>O를 통하여 용제의 양이 다른 지역보다 많이 함유되었다는 사실을 알 수 있다(Fig. 2).

RO<sub>2</sub>와 RO+R<sub>2</sub>O의 몰(mole)비 그래프는 지역별로 분포되고 원주 법천사지 출토 분청사기는 타 지역의 분청사기들과 다른 분포를 나타낸다. 이는 태토 원료가 타 지역 분청사기 태토의 화학조성과 다르다는 사실을 증명하며 원주 법천사지 분청사기는 타 지역에서 유입 되었다기 보다는 원주 근방 요지에서 독자적으로 생산되었을 가능성이 크다. 또한 영동지역 강릉 보광리 출토 분청사기는 RO<sub>2</sub>와 SiO<sub>2</sub>의 함유량이 높아 원주 법천사지 출토 분청사기와 확연한 차이를 나타내어 영동·영서 간에는 남북으로 놓인 백두대간의 높은 산세 때문에 교류가 쉽지 않았음을 알 수 있다.

## 3.2. 미세구조

분청사기 시편의 미세구조를 관찰하기 위해 주사전자현미경(SEM, Scanning Electron Microscope) 이미지를 Fig. 3과 Fig. 6에 나타내었다. 반사전자 이미지(backscatter electron image)에서는 원자번호가 높으면

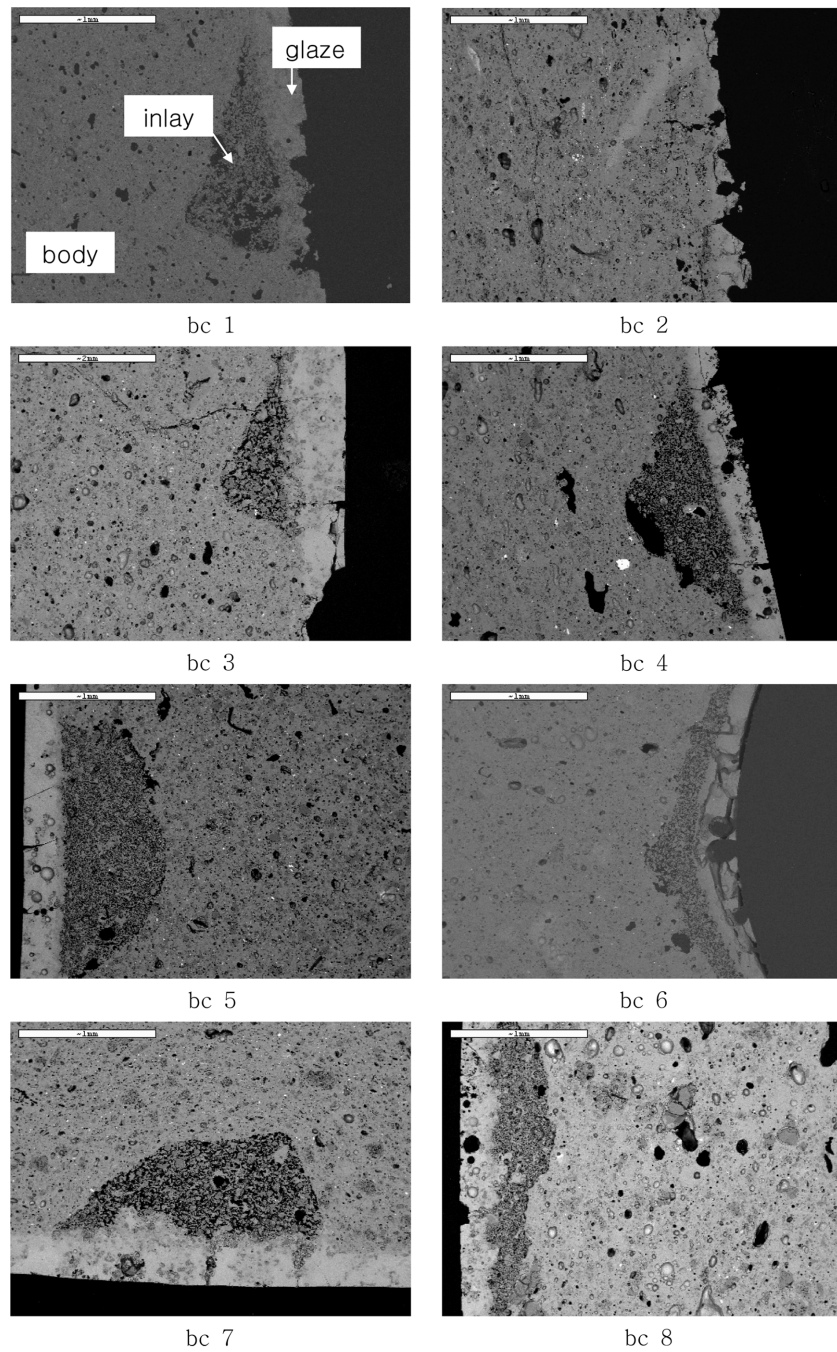


Fig. 3. Microstructure of the sample's body, glaze, inlay layer observed by SEM. All scale bars are 1 mm.

밝게 나타나고 낮을수록 어둡게 나타나는데 태토, 유약, 상감 부분을 반사전자 이미지로 관찰한 결과 태토와 유약사이에 상감된 부분이 가장 어둡게 보이며 Ca이 다량 분포한 유약 부분이 Al과 Si가 다량 분포한 태토

와 상감 부분보다 더 밝게 나타난다. EDS 분석은 bc1-bc8의 대상 시편 중 대표적으로 bc4와 bc5를 Fig. 4와 Fig. 5에 나타냈다. 태토, 유약 및 상감 부분에는 공통적으로 Al과 Si가 많이 분포하고 있고, 유약에는 Ca 성

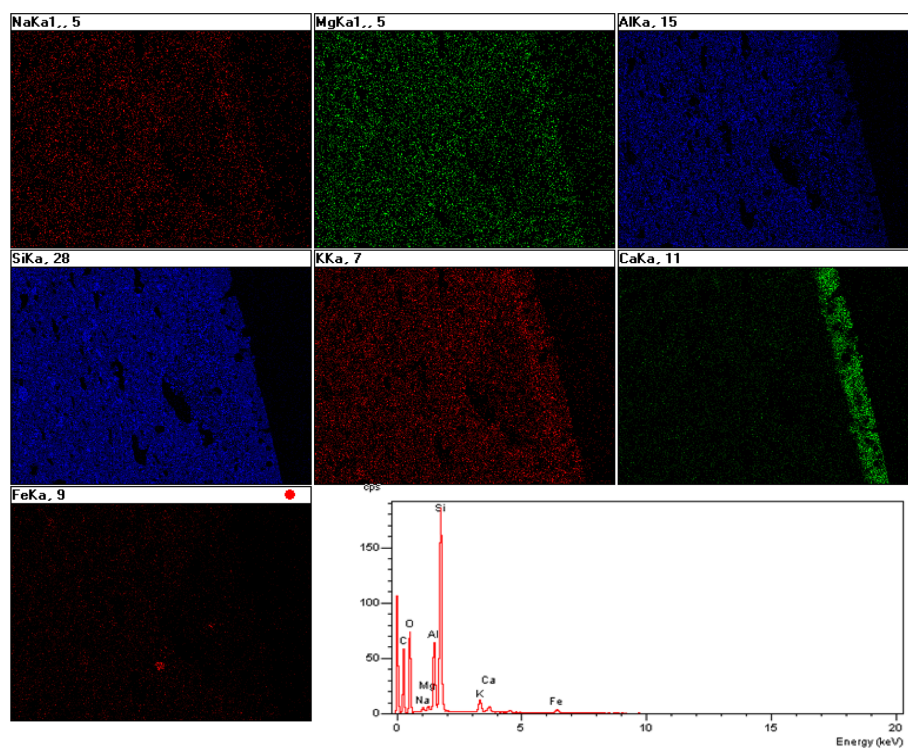


Fig. 4. Elements map of the sample (bc4 in Fig. 3) observed by EDS( $\times 40$ ).

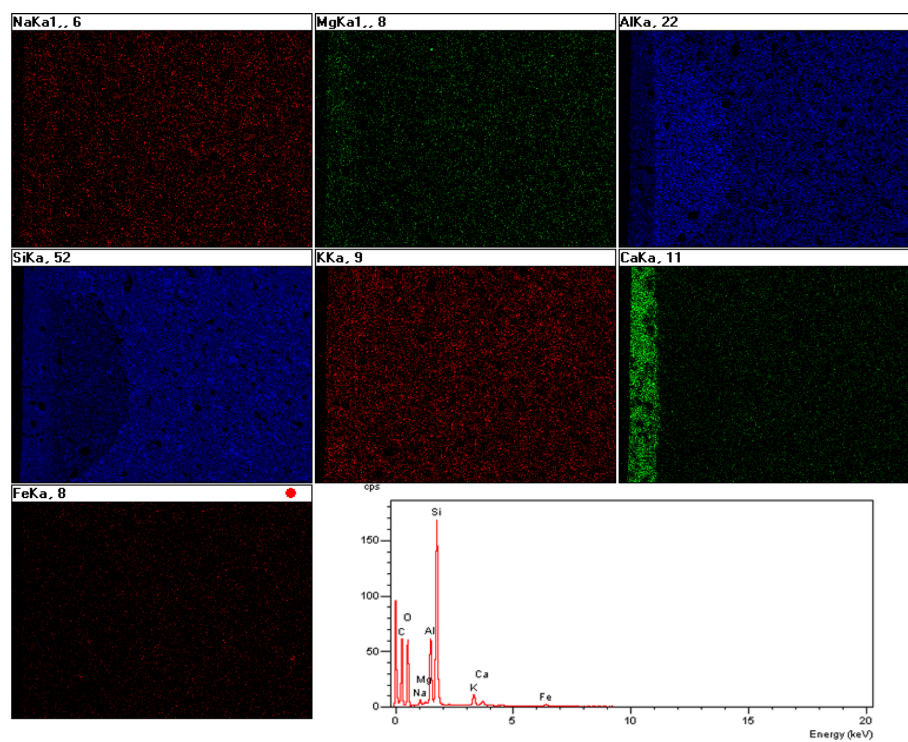


Fig. 5. Elements map of the sample (bc5 in Fig. 3) observed by EDS( $\times 40$ ).

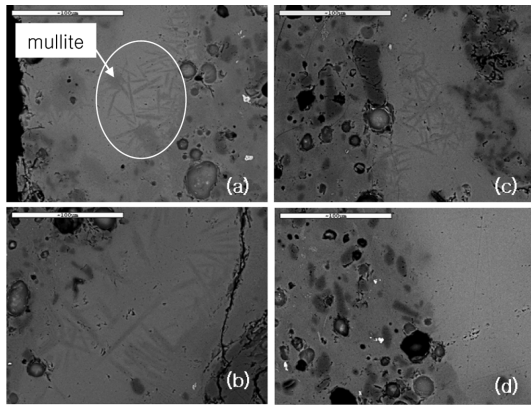
분이 많이 함유되었음을 알 수 있다. 또한 Fig. 5를 통해서 상감 층에 Al 성분이 더 많이 분포되어 있는 사실을 알 수 있는데 이는 유약 층과 열팽창계수의 격차를 크게 하여 유약 내부에 균열이 발생하는 원인이 된다.<sup>4</sup>

태토, 유약 및 상감의 반사전자 이미지로부터 상감된 부분이 선 상감된 부분인지 또는 인화된 부분인지를 알 수 있다. bc2에서는 상감이 제대로 매워지지 않아 상감과 태토의 경계면에 유약이 흘러 들어간 부분이 확인되고 bc1, bc3, bc4에서 삼각형태 상감과 bc5, bc7에서 등근형태의 선 상감 층이 관찰되며 bc6, bc8과 같이 유약 층과 평행하고 길게 형성된 인화 상감도 확인할 수 있다(Fig. 3). 또한 Fig. 6에서 보이는 바와 같이 유약과 태토 경계 부분과 유약 내부에서 형성된 몰라이트가 관찰되었다. 시편 내부에는 소결 과정에서 발생한 기공과 균열이 확인되었지만, 원주 법

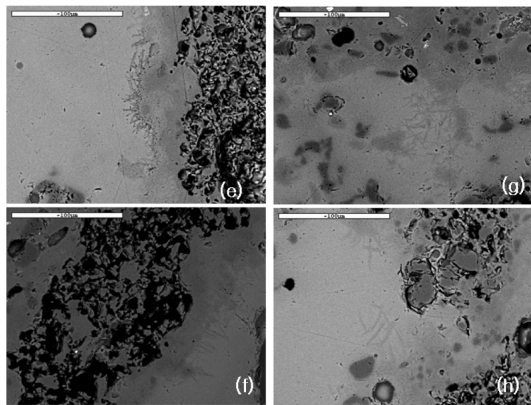
천사지 에서 출토된 분청사기는 소결과 치밀화 상태가 양호함을 알 수 있었다.

### 3.3. 결정상 분석

분청사기 시편 태토의 XRD 분석 결과 결정상으로는 석영(quartz), 몰라이트(mullite)와 장석류(feldspar)인 미사장석(microcline,  $K(AlSi_3)O_8$ )과 소다장석(albite,  $Na(AlSi_3)O_8$ )이 관찰되었다(Fig. 7, 8). 도자기의 소성 과정에서 카올리나이트(Kaolinite)는 500-550 °C에서 결정수가 제거되고, 800-900 °C에서는 비정질의 유리질 상태로 되며 1000 °C에서 1차 몰라이트(primary mullite)가 생성된다. 1250 °C에서는 장석이 용융되면서 침상 형태의 2차 몰라이트가 생성된다.<sup>5</sup> 또한 실리카(silica)의 결정에는 석영과 트리디마이트(tridymite), 크리스토팔라이트(cristobalite)가 있는데 석영은 상온



(a) bc1, (b) bc2, (c) bc3, (d) bc4



(e) bc5, (f) bc6, (g) bc7, (h) bc8

Fig. 6. Microstructure of the mullite in sample (bc1-bc8) observed by SEM backscatter electron image. All scale bars are 100  $\mu$ m.

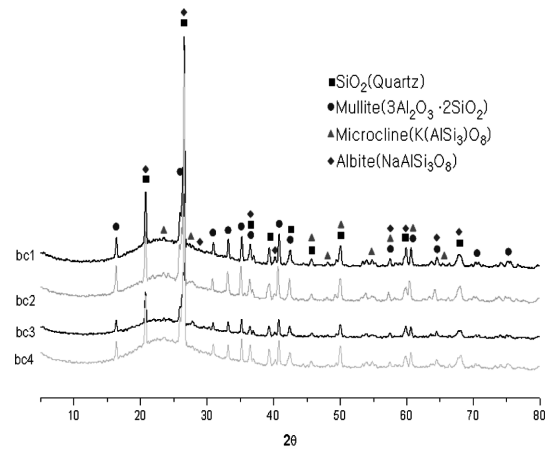


Fig. 7. XRD pattern of samples (bc1-4).

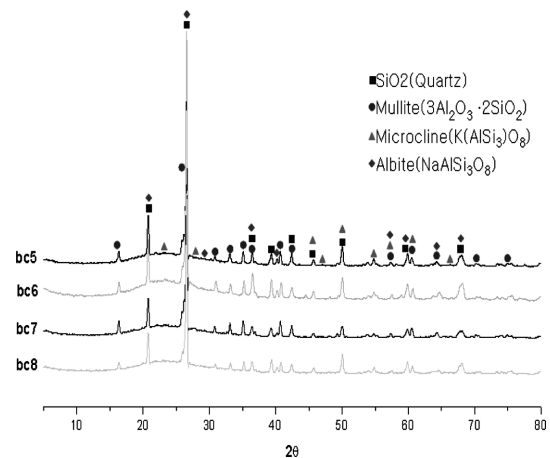


Fig. 8. XRD pattern of samples (bc5-8).

에서 가장 안정된 형태이며, 상압에서 870 °C 이하의 온도까지 안정형이다. 트리디마이트는 870-1470 °C, 크리스토팔라이트는 1470-1728 °C에서 안정한 형태이며 그 이상의 온도에서는 용해되어 실리카 유리(silica glass or fused silica)가 된다.<sup>3</sup> 이와 같은 상전이 현상은 매우 느리므로 870 °C 이상에서 석영이 존재할 수 있으며, 일단 트리디마이트나 크리스토팔라이트로 변화된 것은 그 전이 온도 이하에서도 준안정상태로 존재하게 된다. 그러나 이러한 느린 전이는 다른 성분을 첨가함으로써 전이속도가 변화하는데, 실제로 태토 내부에 용제(flux)로 작용하는 다량의 장석이 포함되어 그 보다 낮은 온도에서 전이가 일어나게 된다. 용제로 작용하는 장석류(feldspar)인 미사장석과 소다장석 피크는 1050-1100 °C에서 용융되어 비정질화 된다.<sup>5,6</sup> bc1-bc8의 시편은 주결정상인 석영과 몰라이트 이외에 미사장석과 소다장석이 나타나는 것으로 보아 소성 온도는 1000-1100 °C인 것으로 추정된다. bc1-bc8 시편 모두에서 미사장석은 비슷하게 나타나 칼리장석질 점토가 사용되었으며, bc4, bc5, bc6에서 Na 함량이 높은 것으로 보아 소다장석질 점토가 이용된 것으로 보인다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 원주 범천사지 구역 출토 분청사기 시편에 대해 화학조성 및 미세구조와 결정상을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다. 또한 원주 범천사지 출토 분청사기의 특성을 조사하기 위하여 다른 지역에서 출토된 분청사기들과 비교해 보았다.

1. 태토의 화학성분 분석 결과, bc1-bc8의 평균은 SiO<sub>2</sub> 66.89, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 20.84, Na<sub>2</sub>O와 K<sub>2</sub>O가 1.11 및 4.83 wt% 함유되어 분청사기 제작 시 용제로 알칼리 장석을 사용했음을 알 수 있다. 유약의 경우 용제 성분 중 CaO 함량이 높은 전형적인 석회계열(lime type) 유약에서 K<sub>2</sub>O와 Na<sub>2</sub>O 함유량이 약간 증가하고 CaO 함유량이 약간 감소하는 석회-알칼리 계열(lime-alkali type) 유약으로 변천되는 과정의 분청사기임을 알 수 있었다.

2. 미세구조 분석을 통하여 제작 기법과 상감 문양 등을 관찰 하였으며 분청사기 시편 중 일부는 삼각형태의 상감, 둥근형태의 상감, 인화된 부분이 관찰되었다. 태토와 유약 경계나 유약 내에 몰라이트(mullite) 결정상이 관찰되고 시편의 치밀화 상태가 양호하였다.

3. 결정상으로는 석영(quartz), 몰라이트(mullite)와 장석류(feldspar)인 미사장석(microcline, K(AlSi<sub>3</sub>)O<sub>8</sub>)과

소다장석(albite, Na(AlSi<sub>3</sub>)O<sub>8</sub>)이 관찰되었다. bc1-bc8의 시편은 주결정상인 석영과 몰라이트 이외에 미사장석과 소다장석이 나타나는 것으로 보아 소성 온도는 1000-1100 °C인 것으로 추정된다.

4. 태토의 제겔식 분석 결과, 원주 범천사지 분청사기의 SiO<sub>2</sub> 함량이 다른 지역 분청사기 보다 소량 함유되어 있고 용제가 다른 지역의 시편보다 많이 함유되어 사용한 태토 원료가 서로 다를 수 있음을 확인할 수 있었다.

#### 참고문헌

1. H. S. Kang, 'Scientific Analysis of Pottery Sherds from Wonnaedong, Daejeon and Ystuchonri, Buan', paper of masters degree, Kongju University, Kongju, Korea, 1-3, 2003.
2. Y. R. Jeon, 'Chemical and Physical Characteristics Analysis of the Pottery from Gwangdae-ri Site in Cheongyang Chungcheongnam-do, Korea', paper of masters degree, Kongju University, Kongju, Korea, 68, 2008.
3. Y. W. O, 'Analyses and calculations in ceramics', 慶南大學校 出版部, 33-174, 1998.
4. K. S. Chae, 'Study of crack glazes', paper of masters degree, Ewha womans University, Seoul, Korea, 8-12, 1986.
5. K. S. Ko, 韓國科學史學會, **14**(1), 23-39 (1992).
6. M. S. Han, 'Scientific Provenance Study for Goryeo Celadon Excavated from Seabed', Ph. D. Dissertation, Chungang University, Seoul, Korea, 120-123 (2006).
7. K.I. Kang and C.J. Jung, *J. Conserv. Sci.*, **6**(1), 15-30 (1997).
8. J. K. Lee, '無機材料原料工學', 半島出版社, 1995.
9. K. N. Kim, S. M. Han and D. Y. Shin, *J. Conserv. Sci.*, **8**(1), 10-15 (1999).
10. Y. E. Lee and K. S. Ko, *J. Kor. Ceramic Soci.*, **42**(3), 251-265 (1998).
11. Y. E. Lee and K. S. Ko, 百濟文化, 32호, 245-259 (2003).
12. Y. S. Lee, 'Analytical and statistical study on the raw materials of korean traditional ceramics', paper of masters degree, Chungang University, Seoul, Korea, 2001.
13. K. N. Kim, S. M. Han, H. P and J. H. Kim, 産業科學技術研究論文集, **10**(-), 95-101 (2005).

14. I. H. Kim, Y. J. Kim, J. Y. Kang, K. S. Ko and S. D. An, 古文化, **72**(-), 83-112 (2008).      15. Nigel Wood, 'Chinese Glazes' A&C Black, **32**, 2000.