

A Study on the Ceramic Body and Art Glaze by Using Coal Ash

Sewri[†], Sung Park, and Yun Joong Chung

Department of Materials Science & Engineering, Myongji University, Yongin 449-728, Korea

(Received May 25, 2009; Revised August 18, 2009; Accepted August 28, 2009)

도예용 소지 및 유에 석탄재 적용 연구

이세우[†] · 박 성 · 정윤중

명지대학교 신소재공학과

(2009년 5월 25일 접수 ; 2009년 8월 18일 수정 ; 2009년 8월 28일 승인)

ABSTRACT

This study is on the application of ceramic body and art glaze by using coal ash according to each wt%. Body color was turned red and dark as increasing coal ash contents in the body and art glaze because of the effect of noncombustible carbon in Fe_2O_3 and coal ash. Not only pore and black core were generated but also absorptance and shrinkage were increased as increasing coal ash contents. The glaze of coal ash 20 wt% showed blue absorption band, turned red band as increasing coal ash contents, Al_2O_3 to SiO_2 ratio got lower and became mat because glaze is estranged from Al_2O_3 to SiO_2 mol ratio 1:10 of transparent glaze as increasing coal ash contents. Glaze showed unstable dissolving condition in the more coal ash contents.

Key words : Coal ash, UV spectrum, FTIR

1. 서 론

석탄재는 일반적으로 크게 비산재(fly ash)와 바닥재(bottom ash)로 구분 된다.^{1,2)} 이중 비산재가 전체 재(total ash)에서 차지하는 비율은 약 80% 정도로 바닥재보다 4배가량 많이 발생되는데 석탄재로 불리며 일부 혼재된 상태로 폐기 된다. 많은 발생량으로 인해 자연적으로 비산재의 활용에 대한 연구는 많이 진행되었다.^{3,4)} 그러나 석탄재는 일반 산업폐기물로 분류되어 단순히 매립 처분되는데 막대한 처리비용과 토양환경오염 등의 여러 가지 문제점을 야기하고 있다.^{5,6)} 이에 따라 폐자원의 재활용을 통한 각종 가치 창조와 매립비용 절감 및 오염원 제거를 통한 경제적·환경적 측면에서의 재활용 방안이 강구되는 추세이다. 또한, 국내외적으로 석탄재를 이용한 다방면의 유효 이용기술의 개발을 통해 석탄재를 자원화 하는 동시에 환경오염 방지를 비롯한 각종 부가 효과를 거두고 있기도 하다. 우리나라에서도 주로 비산재를 중심으로 한 석탄재의 재활용이 꾸준히 증가하여 주로 시멘트 클링커와 콘크리트 혼화제 등으로의 재활용률이 63.2%에 이른

다. 그러나 아직까지 그 수준과 재활용 범위의 다양성에서 주요 선진국에 비하여 낮은 수준이다. 석탄재는 장식과 화학성분이 비슷하여 이를 점토와 혼합 사용하면 전자재의 대체 원료로 가능성이 좋은 재료가 될 수 있다. 현재 우리나라에서는 일부 기업의 점토벽돌에 약 40% 이상을 혼합하여 사용하는데 석탄재에 남아 있는 미연 탄소분이 소성 중 연소함으로써 소성 온도를 낮추고 있다. 도예용 유에서 많이 사용하는 재의 활용재로서 석탄재를 사용하면 양호한 상태의 미립자로 채집이 되어 특별한 공정 없이 바로 사용할 수 있는 장점이 있다.

따라서 본 연구에서는 일반적인 도예용 상용 백자 소지와 도예용 기본 유에 석탄재를 첨가하여 비율에 따른 색상의 변화를 실험, 규명함으로써 활용 가능성을 추구하였다.

2. 실험방법

2.1. 출발원료

출발물질인 석탄재는 서천화력에서 발생 폐기되는 것 중 일반적인 것으로 이에 대한 화학분석 값은 Table 1과 같다. 또한 기본유로 가장 일반적인 투명유의 범위에서 다음과 같은 화학식을 가진 장식-석회유를 임의로 선정하였다.

[†]Corresponding author : Sewri

E-mail : sewri@naver.com

Tel : +82-10-9609-0206 Fax : +82-43-881-0207

Table 1. Chemical Composition of the Used Coal Ash

Coal Ash	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	ig.loss
	52.7	33.5	5.15	1.47	0.87	4.05	0.26	1.73	0.06	0.21	14.43

Table 2. Chemical Composition of the Used White Ware Body

White ware body	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	ig.loss
	66.53	23.37	0.28	0.30	0.18	2.70	1.05	0.04	5.63

Table 3. Mixing Variation of White Ware Body and Coal Ash

Specimen No.	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
White ware body	100	90	80	70	50	30	0
Coal Ash	0	10	20	30	50	70	100

0.37 KNaO 0.46 Al₂O₃ 3.27SiO₂
0.63 CaO

또한 석탄재가 함유된 기본 소지로는 Table 2와 같은 조성을 가진 일반적으로 상용되는 백자 소지를 임의 선정 사용하였다.

2.2. 석탄재의 소지 적용 변화 시험

기본 백자 소지(K사 상용 백자소지)와 석탄재의 비율을 Table 3과 같이 변화시켜 석탄재가 소지에 미치는 물성 변화를 시험하였다. Dry oven에서 건조 분쇄 후 혼합한 각 시료를 disc로 press 성형(1,800 kg/cm²) 시험편을 만들어 소지로 사용하기 위해 도자기 소성 온도인 1280°C에서 2시간 소성하여 외관을 비교 하였다.

2.3. 석탄재의 유 적용 변화 시험

기본 석회 장석유와 석탄재의 함유량 비를 다음과 같이 변화시켜 석탄재가 유의 물성 및 발색에 미치는 변화를 시험하였다. 석탄재는 분쇄하지 않고 원료 상태의 것을 그대로 사용하였다.

유 혼합시료는 800°C에서 초별구이 한 순수한 백자 소지 시편에 적당량 시유하여 1260°C에서 소성함으로써 소지 배색의 효과를 없게 하였다.

2.4. 특성분석

석탄재가 함유된 소지의 물성(흡수율 및 수축률) 변화 및 소지의 결정상 변화를 XRD (M18XHF-SRA, Mac Science, Japan)로 분석하였다. 유 시험편은 석탄재의 유 발색에 미치는 영향과 최적 함량을 규명하기 위해 Munsell 색표시인 색상(H:hue), 명도(V:value), 채도(C:chroma)를 UV 및 UV-vis spectrometer (2401-PC, Shimadzu, Japan)로 측정하였다. 또한 소지 및 유 시료 내 결정상의 고용 관계와 비정질 물질을 분석하기 위하여 FT-IR 분석을 행하였다. FT-IR 분석은 IR Prestige-21 (Shimadzu, Japan)을

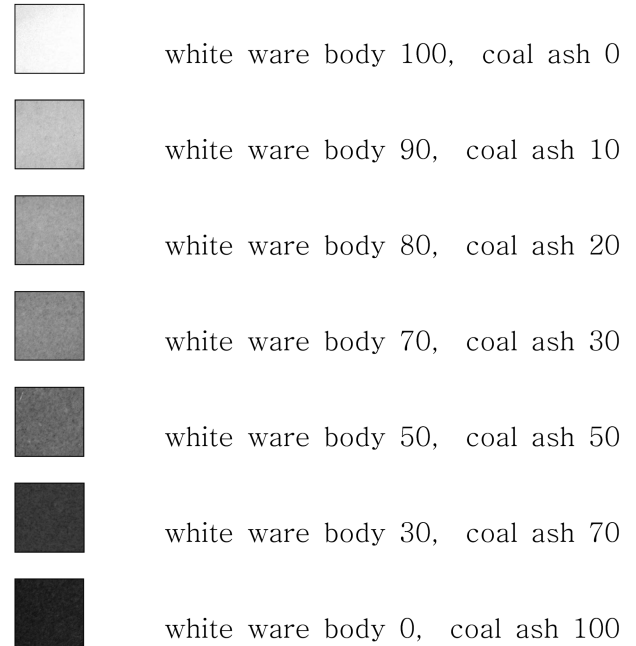


Fig. 1. The color and surface black core changes according to the white ware body and coal ash contents with a firing temperature at 1280°C, respectively.

사용하여 absorbance mode로 측정 하였다. Resolution은 16 cm⁻¹로 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 석탄재의 소지 적용

백자 소지에 석탄재 첨가량을 변화시킨 각 시편에 대해 1280°C에서 2시간 소성한 표면의 상태와 발색변화를 Fig. 1에 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 석탄재의 함유량이 증가되면 K₂O 성분에 의한 유백상의 유리상이 더욱 많이 존재하게 된다. Table 4는 백자소지와 석탄재의 혼합 조성에 대한 화학조성을 나타낸 것이다. 여기에서 알 수 있는 바와 같이 석탄재 속의 미연소 상태의 탄소가 연소됨으로서 생긴 기공과 black core가 발달되고 있음을 알 수 있다. 또한 석탄재 함량의 증가에 따라 백자 소지의 표면 색상이 붉은 색으로 변화되고 있음을 알 수 있다. 이는 Table 4의 백자소지와 석탄재 혼합조성의 화학 조성 변화에서 알 수 있다. 즉, 산화철(Fe₂O₃)이 백자소지 단미의 0.28%에서 석탄재가 증가될수

Table 4. Chemical Composition of Mixed White Ware Body and Coal Ash

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	ig.loss
B1	66.53	23.37	0.28	0.30	0.18	2.70	1.05	0.04			5.63
B2	65.15	24.38	0.77	0.42	0.25	2.84	0.98	0.21	0.01	0.02	6.51
B3	63.76	25.40	1.25	0.53	0.31	2.97	0.89	0.38	0.01	0.04	7.39
B4	62.38	26.41	1.75	0.65	0.39	3.11	0.82	0.55	0.02	0.06	8.27
B5	59.62	28.44	2.72	0.89	0.53	3.38	0.66	0.89	0.03	0.11	10.04
B6	56.85	30.46	3.69	1.12	0.66	3.65	0.50	1.22	0.04	0.15	11.58
B7	52.70	33.50	5.15	1.47	0.87	4.05	0.26	1.73	0.06	0.21	14.43

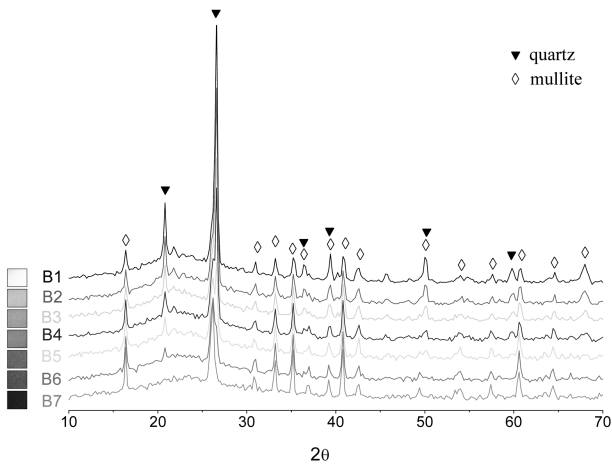


Fig. 2. X-ray diffraction patterns of coal ash contained white ware body fired at 1280°C.

록 함량 비에 따라 점증되어 석탄재 단미의 5.15%까지 다량 함유하게 되어 있다. 따라서 이로 인한 발색의 원인이라고 볼 수 있다.

Table 3의 조합에 따라 소성된 시료의 표면 결정상 생성 여부를 알아보기 위해 X-선 회절분석을 실시하였다. 사용된 석탄재의 화학분석 값에서도 알 수 있는 바와 같이 석탄재는 K₂O와 Na₂O 성분이 다량 함유되어 있어 장석과 같은 유리질의 형성이 용이하다. 또한 미연소 된 탄소 성분이 경우에 따라 다르지만 대략 10% 이상 함유되어 소성 중 연소로 인한 발열로 소성 온도를 저하시킬 수 있어서, 보다 저온에서의 소성이 가능하다. 그러나 도예용 소지에 석탄재가 함유 되었을 때 탄소의 연소로 인한

Table 5. Mixing Variation of Feldspar-Lime Glaze and Coal Ash

Specimen No.	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7
Feldspar Lime Glaze	100	90	80	70	50	30	0
Coal Ash	0	10	20	30	50	70	100

소지의 기공률 증가와 black core의 발생이 우려될 수 있다. 각 시험편에 대한 XRD 측정결과는 Fig. 2와 같다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 모든 소지 시험편에서 주 결정상인 mullite, quartz 등의 peak가 관찰되었다. 석탄재의 함량이 증가될수록 mullite와 quartz의 peak intensity가 줄어들어 주 결정상이 나타내는 강도의 발현이 어려워짐을 짐작할 수 있다. 또한 그림에서 석탄재의 함량이 증가될수록 소지의 색상이 어두워지면서 점차 붉은 색을 나타내는데, 이는 일반적으로 석탄재 속에 함유되어 있는 미연 탄소가 연소되면서 이로 인한 색상의 변화를 가져오는 것으로 생각된다.

백자 소지에 석탄재를 함유시킨 시험편에 대해 흡수율을 측정된 결과는 Fig. 3과 같다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 소성 온도 1280°C에서 백자 소지의 흡수율은 0.2% 정도로 거의 없다. 여기에 석탄재를 20%까지 함유시켜도 흡수율의 변화는 없으나 30% 이상 함유되면 급속하게 흡수율이 증가되고 있는 데 이 까닭은 석탄재가 가지고 있는 미연 탄소분의 함량이 많아지면서 이의 연소로 인한 기공이 형성되어 흡수율이 증가되는 것으로 보인다. Table 4에서도 알 수 있는 바와 같이 ignition loss가 B4의 경우

Table 6. Chemical Composition of Mixed Feldspar-Lime Glaze and Coal Ash

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	ig.loss
G1	59.01	14.12	0.11	10.67	0.17	2.52	4.96				8.44
G2	58.37	16.06	0.62	9.75	0.24	2.68	4.49	0.17	0.01	0.02	9.04
G3	57.75	18.00	1.12	8.83	0.31	2.83	4.02	0.35	0.01	0.04	9.64
G4	57.12	19.93	1.63	7.91	0.38	2.98	3.55	0.52	0.02	0.06	10.24
G5	55.86	23.81	2.64	6.08	0.53	3.29	2.61	0.87	0.03	0.11	11.44
G6	54.59	27.69	3.64	4.23	0.66	3.60	1.67	1.21	0.04	0.15	12.63
G7	52.70	33.50	5.15	1.47	0.87	4.05	0.26	1.73	0.06	0.21	14.43

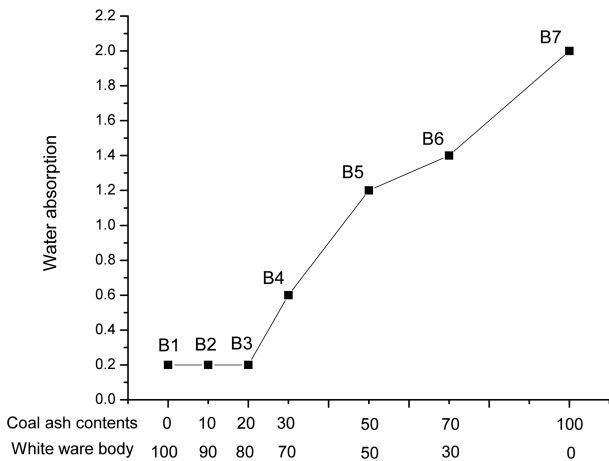


Fig. 3. Water absorption of coal ash contained white ware body fired at 1280°C.

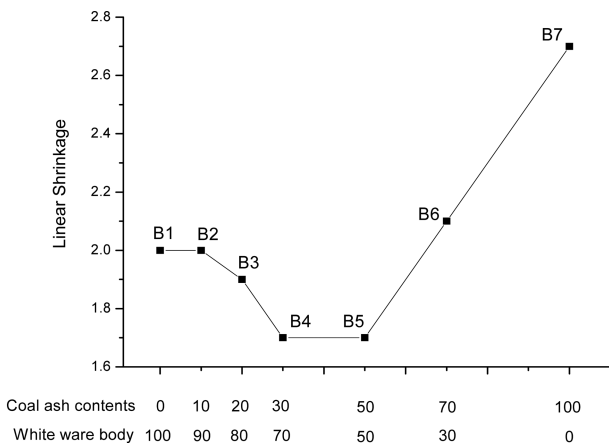


Fig. 4. Linear shrinkage of coal ash contained white ware body fired at 1280°C.

8%를 넘어 서고 있으며 순수한 석탄재의 경우 14% 이상으로 매우 높아 전술한 흡수율의 급격한 증가의 요인이 되어 도예용 소지로서는 적당하지 않다고 볼 수 있다.

백자 소지에 석탄재를 조합한 소지를 1280°C로 소성 한 후 수축률을 측정 한 결과는 Fig. 4와 같다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 백자 소지와 석탄재의 함량 비가 70:30이 되기까지 수축량이 줄어들다가 석탄재의 함량이 50%가 넘어서면서부터는 급하게 수축이 증가되고 있다. 이는 Table 4에 나타난 바와 같이 석탄재의 함량이 증가 할수록 다량의 미연 탄소분이 연소됨으로서 강열 감량이 증가하기 때문이라고 볼 수 있다.

3.2. 석탄재의 유 적용

장석-석회유에 석탄재 함량을 변화시킨 시편의 가시광선 영역(380 nm~800 nm) 내외에서 파장 변화에 따른 빛의 흡수를 측정함으로써 유 의 발색 변화를 관찰하였다. Fig. 5는 유 표면을 자외선-가시광선 스펙트럼 분석한 것

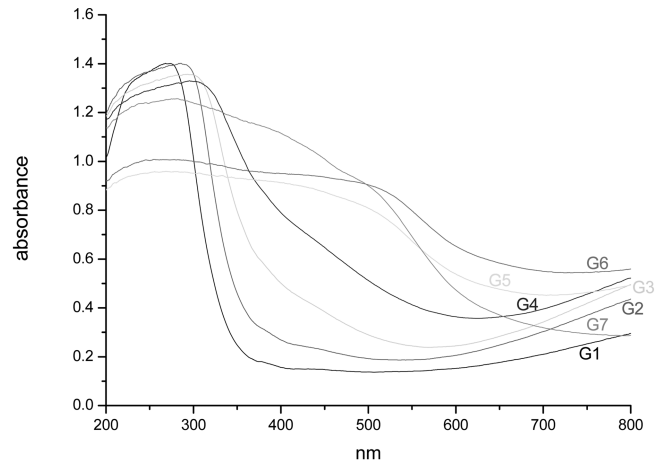


Fig. 5. UV-Visible absorption spectra of coal ash contained glazes.

으로 그림에서 석탄재의 함량이 커질수록 가시광선영역의 흡수 peak가 적외선 영역으로 shift 되는 것을 알 수 있다. 즉 기본 장석-석회유의 경우 violet (400~420 nm)에서 흡수 band가 나타나고 석탄재가 20% 함유된 G3(혼합 조합된 전체 유 중 Fe₂O₃의 함량은 1.12%)의 경우 blue (440~490 nm)의 흡수 band가 그리고 이후 석탄재의 함량이 증가될수록 yellow (570~585 nm)로 이동해가는 것을 알 수 있다. G1, G2 및 G3 시편은 에너지를 가진 빛에 노출되었을 때 Fe₂O₃ 분자 내의 전자 전이에 의해 높은 에너지 궤도로 올라가 전자를 흡수하고 있다. 이들 시편은 흡수 강도가 1.3~1.4 (69.3% 흡수, 물 흡수도 ε=27.7) 정도이며 G5 및 G6은 흡수 강도가 0.9~1.0 (49.5% 흡수, 물 흡수도 ε=19.8)으로 비교적 낮다. 조합 혼합유 전체의 Fe₂O₃ 함량 변화에 따라 Fe₂O₃ 분자 전이에 의한 흡수도 차이가 있음을 알 수 있다.

전술한 바와 같이 석탄재를 함유한 장석-석회유의 경우 함량 변화에 따라 발색에 영향을 미치는 것은 Fe₂O₃ 성분으로, 제조한 유 시편의 산화철 함량은 0.11% 부터 최대 5.15% 범위 내에 있다. 따라서 주된 색의 변화는 Fe₂O₃의 영향으로 보나 혼합 조합성분 중 TiO₂의 점진적인 증가로 이에 의한 영향도 고려해 볼 수 있다. Fig. 6은 이들에 대한 자외선 흡수로 Munsell 표색계의 a*(색상, hue) 및 b*(채도, chroma)를 확인한 결과이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 석탄재가 50% 이상 함유되면 붉은 색 계통으로 그리고 그 이하 함유되면 청색 계통의 색을 나타내고 있음을 알 수 있다. 석탄재가 20% 함유 된 G3 시편의 경우 유의 발색이 균질하게 밝은 청색을 띠고 있으나 석탄재가 30% 함유되면 회색조를 나타내고 있다. 일반적으로 산화철의 함량변화에 따른 장석-석회유의 특성으로 색상의 변화가 민감하게 진행되고 있음을 추정할 수 있다.

석탄재의 첨가 함량에 따른 유의 색과 구성 성분의 변화에 따른 광택여부의 관계를 규명하고자 적외선 분광한

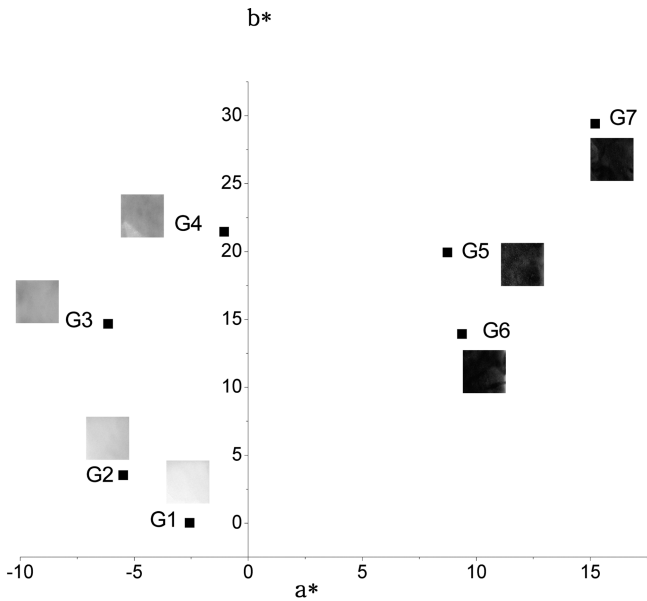


Fig. 6. UV data CIE a* and b* colourimetrics parameters of glazed samples.

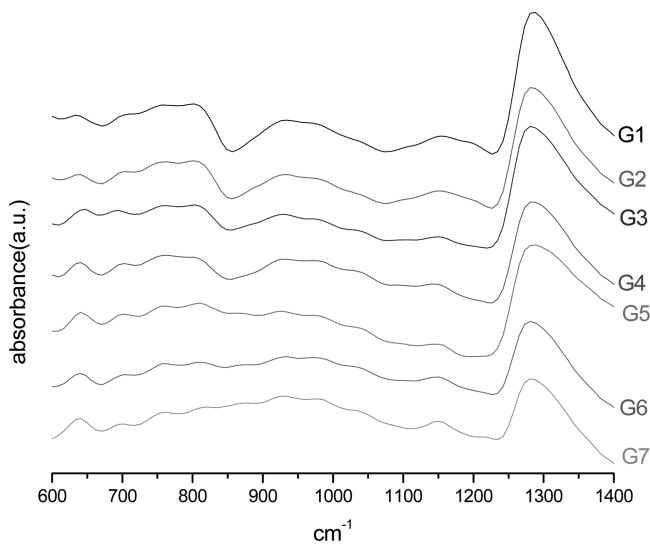


Fig. 7. FT infra red absorption spectra of coal ash contained glazes.

결과는 Fig. 7과 같다. 그림에서 850 cm^{-1} 의 Si-O 신축진동과 1100 cm^{-1} 의 Si-O 변각진동이 주로 나타남을 알 수 있다. 또한 장식-석회 기본 유에 석탄재가 다량 함유된 조성 일수록 850 cm^{-1} 의 흡수 peak 강도가 적어지는 것을 알 수 있어 이로부터 다음과 같이 각 유의 조성 중 SiO_2 함량에 따른 $\log I_0/I$ 를 구하여 각 유의 조성에서 Al_2O_3 와 SiO_2 의 몰 비를 구한 결과와 비교하였다. G1, G2, G3 및 G4로 석탄재의 함량이 증가할수록 Al_2O_3 와 SiO_2 의 비가 작아져 광택유의 중심축이 되는 Al_2O_3 와 SiO_2 의 몰 비 1:10 범위로부터 멀어지면서 mat 유로 되고 그 이상에서는 유가 불안정한 용융 상태를 나타내고 있는 것을 알 수

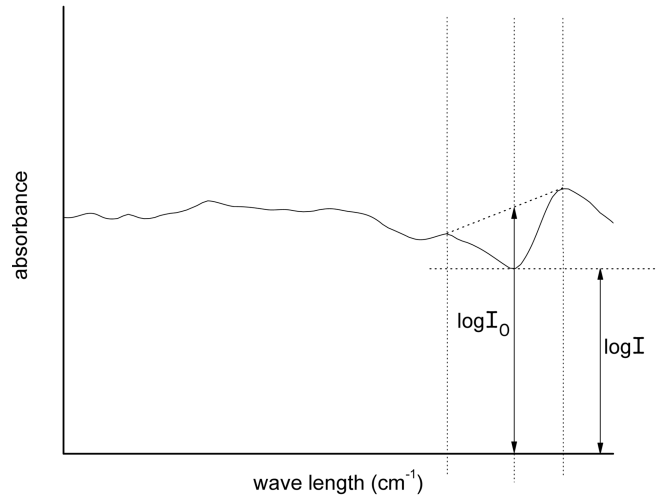


Fig. 8. Measuring method of $\log I_0/I$ from the peak of infra red absorption spectra.

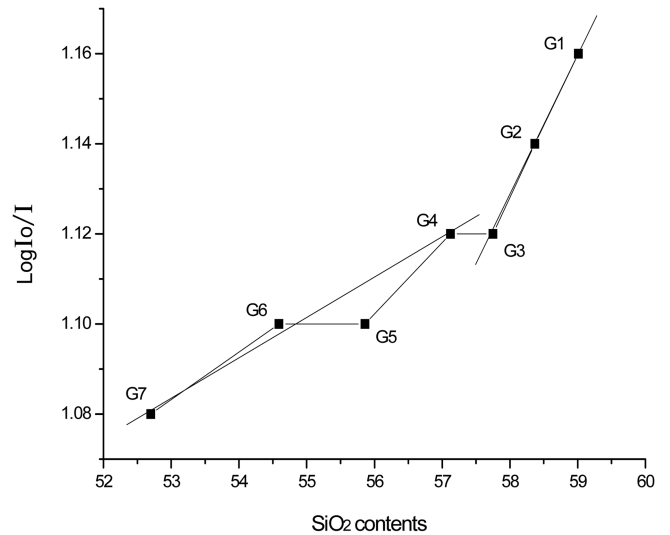


Fig. 9. FT infra red absorption spectra intensity ratio ($\log I_0/I$) of coal ash contained glazes according to the SiO_2 contents at wavelength 1100 cm^{-1} .

있는데 이는 각 유 시편의 SiO_2 의 함량에 따른 $\log I_0/I$ 를 Fig. 8의 방법으로 plot 한 Fig. 9의 결과에서도 짐작할 수 있다. 즉 그림에서 G3 점에서 변곡점을 나타내는 것으로 미루어 G1, G2 및 G3이 나타내는 직선 경향의 기울기에서 광택유의 범위에 있음을 추정할 수 있다. 또한 G5, G6 및 G7를 연결한 직선의 기울기는 G1, G2 및 G3이 이루는 직선의 기울기와 다른 경향을 보이고 있어 광택유가 아닌 것으로 추정할 수 있는데 이는 유의 표면관찰 결과와 일치하고 있음을 알 수 있다. 850 cm^{-1} 의 신축진동 peak는 G1, G2, G3 및 G4에서만 관찰되었는데 이로부터 $\log I_0/I$ 를 측정하여 plot한 결과는 Fig. 10과 같다. 이 결과는 Fig. 9와 유사하며 이들 유 조성은 광택 유 범위에 있음을 추정할 수 있다.

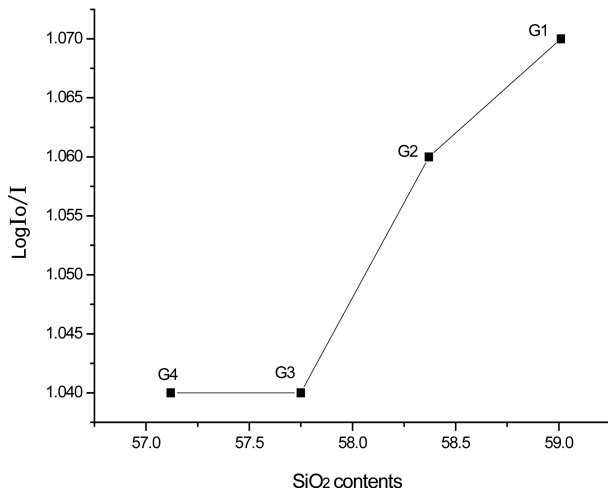


Fig. 10. FT infra red absorption spectra intensity ratio(Log I_0/I) of coal ash contained glazes according to the SiO_2 contents at wave length 850 cm^{-1} .

4. 결 론

기본이 되는 백자소지와 장석-석회유에 석탄재를 혼합하여 함량 변화시킨 본 연구에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 석탄재 함량의 증가에 따라 산화철과 석탄재 속의 미연소 탄소의 영향으로 소지의 색상이 어두워지면서 점차 붉은 색을 나타내며 기공과 black core가 발생된다. 석탄재의 함량 증가에 따라 미연소 탄소분의 함량이 많아지면서 석탄재 20% 함유까지 흡수율의 변화는 없으나 30% 이상 함유되면 급속하게 흡수율이 증가된다. 이러한 경향은 수축률에서도 비교적 유사한 경향을 보이고 있다.

(2) 기본 장석-석회유에 석탄재가 20% 함유된 G3(혼합 조합된 전체 유 중 Fe_2O_3 의 함량은 1.12%)의 경우 blue (440~490 nm)의 흡수 band가 그리고 이후 석탄재의 함량이 증가될수록 yellow (570~585 nm)로 이동해가는 것을 알 수 있다. 또한 흡수 강도가 1.3~1.4 (69.3% 흡수, 물 흡수도 $\epsilon=27.7$) 정도이며 석탄재의 함량이 많아질수록 흡수 강도가 0.9~1.0(49.5% 흡수, 물 흡수도 $\epsilon=19.8$)으로 비교적 낮다.

(3) 기본 장석-석회유에 석탄재가 50% 이상 함유되면 붉은 색 계통으로 그리고 그 이하 함유되면 청색 계통의 색을 나타내고 있음을 알 수 있다. 석탄재가 20% 함유된 G3 시편의 경우 유의 발색이 균질하게 밝은 청색을 띠고 있으나 석탄재가 30% 함유되면 회색조를 나타내었다.

(4) 기본 장석-석회유에 석탄재의 함량이 증가할수록 Al_2O_3 와 SiO_2 의 비가 작아져 광택유의 중심축이 되는 Al_2O_3 와 SiO_2 의 물 비 1:10 범위로부터 멀어지면서 mat

유로 되고 그 이상에서는 유가 불안정한 용융 상태를 나타내었다. SiO_2 의 함량에 따른 $\log I_0/I$ 는 G3 시편에서 변곡점을 나타내어 이로부터 광택유의 범위를 추정할 수 있다.

따라서, 유의 경우 석탄회 첨가에 따른 단계적 색상변화를 도예용으로 활용할 수 있고 백자소지에는 20%까지 안정된 도예용 소지로서 적합함을 알 수 있다.

REFERENCES

1. J. U. Lee, S. M. Lee, H. T. Kim, E. S. Choi, and Y. S. Lee, "Micro Structure and Mechanical Properties of the Sintered Kaolin Block with Fly Ashes," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **39** [12] 1164-70 (2002).
2. K. N. Kim, J. H. Kwon, and D. Y. Shin, "The Manufacturing of Fly Ash System Ceramics Bricks," *J. Kor. Solid Wastes Eng. Soc.*, **18** [5] 459-67 (2001).
3. C. L. Verma, S. K. Handa, S. K. Jain, and R. K. Yadav "Techno - Commercial Perspective Study for Sintered Fly Ash Lightweight Aggregates in India," *India, Construction and Building Mat.*, **12** 341-46 (1998).
4. J. O. Hong and S. G. Kang, "Characteristics of Sintered Bodies Made from the System of Paper Sludge Ash-FlyAsh-Clay," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **38** [10] 908-13 (2001).
5. C. N. R. Rao, *Chemistry of Advanced Materials*, pp. 179-83, Blackwell Scientific Publications, London, 1993.
6. J. Mukerji, "Nitride Ceramics-A Brief Account of Work Done in CGCRI," *Key Engineering Materials*, **56-57** 107-20 (1991).
7. K. H. Shin and B. H. Lee, "Synthesis of Fe_2O_3 - CoO - Cr_2O_3 - MnO_2 Pigments and Coloring in Glazes," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **44** [10] 554-61 (2007).
8. K. G. Lee, H. J. Lee, C. J. Park, D. W. Kim, Y. T. Kim, and S. B. Kim, "A Study on the Plasticity Enhancement of Coal Fry Ash-Clay Bodies," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **33** [2] 135-42 (1996).
9. K. Ramamurthy and K. I. Harikrishnan, "Influence of Binders on Properties of Sintered Fly Ash Aggregate," *India, Cement & Concrete Composites*, **28** 33-8 (2006).
10. Sunil Kumar, "A Perspective Study on Fly Ash Lime Gypsum Bricks and Hollow Blocks for Low Cost Housing Development," *India, Construction and Building Mat.*, **16** 519-25 (2002).
11. M. Nisnevich, G. Sirotn, T. Schlesinger, and Y. Eshel, "Radiological Safety Aspects of Utilizing Coal Ashes for Production of Lightweight Concrete," *Israel, Fuel*, **87** 1610-16 (2008).
12. M. Erol, S. Kkbayrak, and A. Ersoy-Meriboyu, "Characterization of Sintered Coal Fly Ashes," *Turkey, Fuel* **87** 1334-40 (2008).
13. N. Degirmenci, A. Okucu, and A. Turabi, "Application of Phosphogypsum in Soil Stabilization," *Turkey, Building and Environment*, **42** 3393-98 (2007).