



도자기 산업에서 무기계 폐기물의 재활용

오유근·정훈·황광택
 요업기술원 도자기연구센터
 ykoh@kicet.re.kr

1. 서론

과거 우리나라의 도자 문화가 일찍이 꽃피워진 이유 중의 하나가 국내 고령토, 점토, 도석과 같은 가소성 원료와 장식, 규석, 석회석과 같은 비가소성 원료가 타 자원에 비하여 비교적 풍부하고 다양하기 때문이다.

국내에서 제조되는 도자기의 종류는 여러 가지가 있지만 일반적인 분류는 용도에 따른 분류와 물리적 특성에 따른 분류로 나눌 수 있다. 용도에 따른 분류는 크게 4가지로 나눌 수 있는데 전통도자기(청자, 백자, 분청사기 등의 예술도자기), 생활도자기(도자기질 식기류, 다기류 등), 건축도자기(도자기질 타일, 위생도기, 점토질 벽돌, 기와 등) 그리고 공업용 도자기(애자, 화학자기, 절연자기) 등으로 분류할 수 있으며, 물리적 특성에 따른 분류 역시 일반적으로 4가지로 나누는데 토기, 도기, 석기 그리고 자기로 나누고 있다.

최근까지는 국내에서 산출되는 천연 원료만으로도 원료 수급 및 확보가 가능하였지만 현재는 국내 원료만으로 원활한 수급 및 확보가 불가능하게 되어 수입에 의존하고 있어 수입대체 및 원활한 확보를 위해 대체 원료에 대한 관심이 높아지게 되었다. 동일시점에서 '자원의 절약과 재활용촉진에 관한 법률(1992)'이 제정되어 시행이 강화되고, NIMBY 현상에 효과적으로 대응하기 위한 '폐기물처리시설설치촉진 및 그 주변지역지원 등에 관한 법률(1995)'이 제제화 되었다. 그리고 바젤협약에 가입하면서 '폐기물의 국가간 이동 및 그 처리에 관한 법률(1994)' 시행과 머지않아 강력한 규제가 될 기후변화 협약으로 폐기물 재활용에 의한 순환형 사회실현의 의무화 될 것이다.

국내에서 발생하는 무기계 폐기물의 발생량 그리고 재활용 현황 등을 파악하고 이들의 화학성분 및 물리적 특성 등을 분석하여 도자기 원료로서의 활용 가능한 영역을 확인하고 적용된 제품들의 물성 및 생산된 제품을 중심으로 고찰하였다.

2. 무기계 폐기물 현황

2.1. 무기계 폐기물의 종류 및 처리 기술

폐기물을 이용하여 도자기 산업에서 재활용이 가능한 소재를 개발하는 첫 단계는 각종 폐기물에 대한 발생 현황을 파악하고, 발생하는 폐기물의 물리적(입도, 조성 등), 화학적(조성, 조합 등) 및 광물학적 특성을 파악하여 이를 이용하여 목적하는 소재를 제조하기 위한 1차 원료화 기술을 확보하는 것이다. 각각의 폐기물 특성과 목적하는 최종 소재에 따라 그 처리방법도 매우 다양하다. 하지만 아직까지는 이들 원료들에 대한 처리 방법이 완전히 확립되어 있지 않고 다양한 연구가 수행되어지고 있는 실정이며, 물성에 영향을 미치지 않고 자체로서 재활용될 수 있는 부분에서만 재활용되고 있다. 대량으로 발생하는 무기계 폐기물의 종류 및 처리 기술을 Table 1에 나타내었다. 따라서 이들 폐기물들의 경우 선별, 파쇄, 분급 등의 처리 기술과 함께 혼합, 복합 처리 및 유리화 과정을 통한 안정적이고 균일한 원료로 제조하는 기술을 확립하고 이를 통하여 다양한 도자기 소재 개발의 기반을 확보하는 것이 중요하다.

2.2. 무기계 폐기물의 성분

현재 국내에서 대량으로 발생하고 무기계 폐기물들의

Table 1. 대량으로 발생하는 폐기물의 종류 및 처리 기술

폐기물종류	처리 기술
폐 석 분	- 자체 성토 매립(재생신고)
소각재 (석탄회)	- fly-ash시멘트 - 경량골재 - 레미콘용 혼화제 - 자체 성토장 매립
파쇄물(샤모트)	- 경량골재
무기성오니	- 콘크리트제품 부원료 - 시멘트 부원료 - 성토 매립용

화학성분 분석 결과를 살펴보면 Table 2와 같다. 이들은 도자기 원료로 사용되는 천연 원료의 성분과 유사한 경향을 나타내고 있지만 천연원료와는 큰 차이를 나타내고 있다.

소각재와 슬래그의 경우는 SiO₂와 Al₂O₃의 함량은 거의 유사지만 Fe₂O₃와 CaO의 함량에서 차이를 보이고 있는 것을 알 수 있다. AP 오니의 경우 세라믹의 연마과정에서 발생되는 것으로 연마제인 알루미늄이 주성분을 이루고 있으며, 연마된 일부의 SiO₂와 CaO가 부성분인 것을 확인할 수 있었다. 따라서 이들 폐기물이 함유하고 있는 SiO₂, Al₂O₃, CaO 등을 원하는 비율로 혼합하여 천연 원료를 이용하여 조합한 batch와 동일하게 조합하는 것이 가능할 것으로 판단된다. 이들 원료들만으로는 도자기를 제조하는데 어려움이 있으므로 폐기물과 천연 원료를 적절하게 혼합하여 천연원료만으로 조합하여 합성한 제품에서 가지는 물성을 나타내는 것을 확인할 수 있었다.

3. 도자기에서 무기계 폐기물의 활용

3.1. 대형 도판

폐기물을 이용하여 도판을 제조하기 위해서는 도판 제조용 원료인 점토, 규석, 장석 그리고 도석 등의 원료 화학성분을 분석하는 것이 중요하다. 화학성분분석 결과를 Table 3에 나타내었다. 각 원료별 화학 성분을 살펴보면 SiO₂와 Al₂O₃가 주성분이며 미량의 철분이 함유되어 있다. 규석은 도판에서 골재역할을 하는 성분이며, 점토는 성형과정에서 가소성을 부여하는 역할을 하게 된다. 장석은 내화도가 낮고 소결을 용이하게 하는 특성을 가지고 있다.

이들 특성을 가진 원료들을 이용하여 대형 도판의 제조시에는 건조 및 소성 수축을 제어하는 것이 필요하다. 따라서 일정 비율로 조합된 도자기 원료에 벽돌 생산과

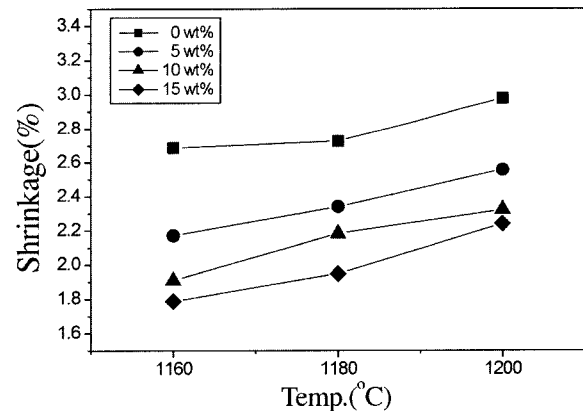


Fig. 1. 샤모트가 첨가된 소성시편의 수축율.

Table 2. 무기계 폐기물 화학성분분석(ICP)

	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	lg.loss
폐석분	67.4	20.0	0.09	-	-	0.24	10.9	-	-	-	
소각재	35.5	11.1	6.85	22.5	2.24	1.09	1.93	1.26	0.01	3.54	
슬래그	32.7	10.5	13.2	38.5	0.25	0.36	1.23	0.37	6.5	2.2	0.29
AP 오니	7.81	81.3	0.99	0.11	0.15	3.51	0.44	0.18	0.02	0.10	5.34

Table 3. 도판 제조용 천연 원료의 화학분석(ICP)

	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	lg.Loss
점토	53.09	18.67	13.17	2.30	0.43	0.69	-	0.29	0.02	0.02	11.12
장석	69.2	18.4	0.08	0.52	0.19	0.08	0.19	0.04	-	-	1.29
규석	98.60	0.26	0.04	0.12	0.17	-	-	-	-	-	0.24

정에서 발생하는 샤모트를 첨가하여 열처리하면 수축율을 제어할 수 있다. 소성 수축제어를 위해 선정된 특정 조성에서의 소성 수축율 측정 결과를 Fig. 1에 나타내었다. 일반적인 도자기 원료만을 이용하여 실험한 경우보다 샤모트가 첨가되어 제조된 시편의 경우 수축율이 감소되었다. 샤모트가 첨가되지 않은 경우 수축율이 2.7~2.9% 정도이지만 첨가량이 증가함에 따라 1.8~2.0% 정도의 수축율 보이고 있다. 또한 열처리 온도가 증가함에 따라 현저하게 수축율이 감소되는 경향을 보이고 있다.

앞에서 얻어진 결과를 이용하여 제조된 도판을 Fig. 2에 나타내었다. 제조된 대형 도판들은 힘과 뒤틀림이 약

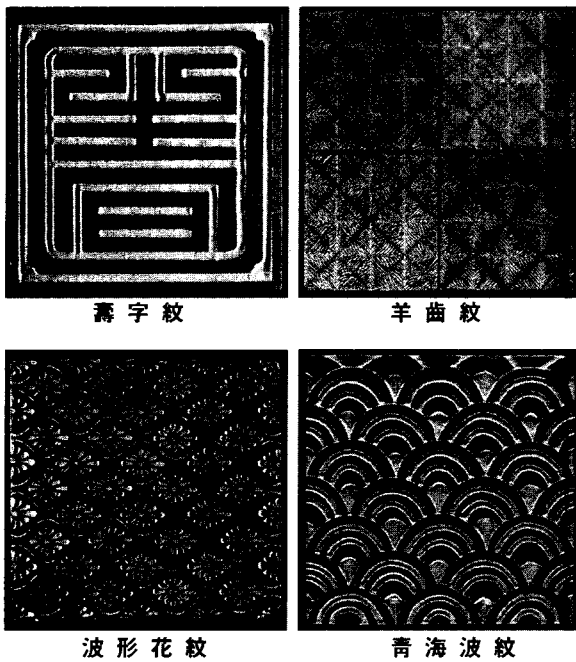


Fig. 2. 제조된 대형 도판 사진.

제되었으며 다양한 문양을 첨가하여 내장용으로 활용이 가능하며, 현재 월드컵 상암경기장 등 여러 곳에 시공되었다.

3.2. 경량 점토질 벽돌

건축 자재로 사용되고 있는 점토질 벽돌은 천연원료를 이용하여 제조되었지만 최근에는 폐기물 중에서 점토질과 같은 성분을 가지고 있는 소각재나 폐석분 등을

이용하여 저가의 제품이 제조되어지고 있다. 하지만 그 자체만으로는 색상 등을 자유롭게 나타낼 수 없다는 단점을 가지고 있다. 따라서 이들에 다양한 무기계 안료를 이용하여 점토질 벽돌 표면에 유약을 분장하는 기술을

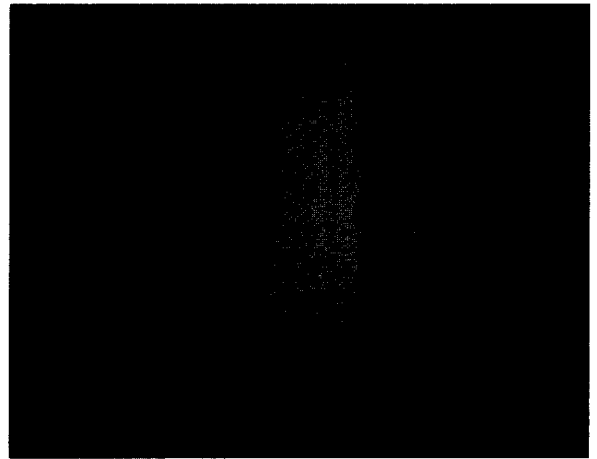


Fig. 3. 폐기물을 이용하여 제조된 분장벽돌.

개발하여 천연 원료를 이용하여 제조된 벽돌보다 더 다양한 효과를 얻을 수 있게 되었다. 천연원료를 이용하여 제조된 벽돌과 폐기물로 제조된 벽돌 위에 다양한 색상으로 분장하여 제조된 분장 벽돌을 Fig. 3에 나타내었다.

3.3. 수질 정화용 필터

금속이나 폴리머를 사용한 필터 시스템에서보다 세라믹 필터가 사용되어야 할 분야가 여러 가지 있다. 우선 세라믹의 난소결성에 의해 제조 공정이 복잡하고 공정의 제어가 어려우며, 또한 세라믹이 가지는 단점인 취성이나 대량생산에서의 신뢰성 문제를 들 수 있다. 과거 수질 속에 함유되어 있던 부유 입자의 제거에만 사용되었지만 최근에는 초순수의 제조 및 대기 오염방지를 위한 영역에까지 적용범위가 넓어지고 있다. 또한 국내에는 발효균의 분리를 위한 대량생산 공정에 세라믹스 필터가 사용되고 있으며, 공장 폐수 및 지하수의 정수분야 등으로 이용 분야가 점차 확대되고 있다. 최근까지는 세라믹 필터의 제조는 가공된 고순도 원료만을 사용하여 제조하였으나 폐기물 재활용에 관한 법률이 제정되면서부터 폐기물을 이용하여 환경 정화용 물라이트계 ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$) 자기질 필터를 제조하는 기술이 활발

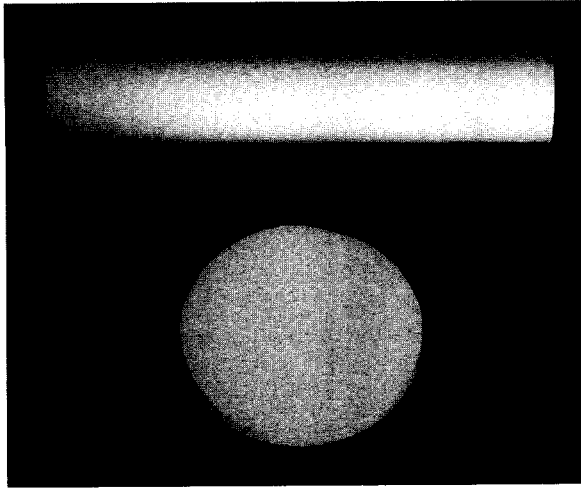


Fig. 4. 폐기물을 이용한 물라이트계 자기질 필터 사진.

하게 연구되어 지고 있다. 일반적인 수질 정화용 필터의 모듈 및 폐기물을 이용하여 제조된 두 가지 형태의 물라이트계 필터를 Fig. 4에 나타내었다.

필터의 적절한 활용을 위해서는 적용하고자 하는 수질의 오염 정도에 따라 일정 크기의 기공이 형성된 필터를 사용한다. 또한 세라믹의 장점인 내열·내식성 및 내화학성을 이용하여 다양한 분야에 적용이 가능하며, 장시간 사용 후 정화 작업의 작동을 중지하지 않고 단순 역세척만으로 지속적으로 사용 가능하며 장기간 사용후 간단한 처리에 의해 재활용이 가능하여 이차 오염물이 발생하지 않는다.

3.4. 수질 정화용 미생물 담체

세라믹 담체를 이용한 생물막 폐수처리 공정은 반응기 내에 다양한 미생물이 증식할 수 있을 뿐만 아니라, 담체의 수명이 길고 슬러지의 자기 산화가 촉진되기 때문에 폐슬러지의 발생량이 적은 이점이 있다. 또한 다양한 미생물종이 군집을 형성함으로써 온도와 pH 변동, 충격부하 및 난분해성 물질유입에 따른 대처능력이 뛰어나고 슬러지 부상 등과 같은 문제점을 줄일 수 있다고 알려져 있다. 상용화되고 있는 세라믹 다공성 담체는 펠렛형의 담체와 큐빅형의 담체로 구분할 수 있다.

폐수처리에 사용되는 담체는 초기에는 폴리머나 천연석을 이용하기도 하였으나, 점차로 미생물의 부착능

을 고려하여 인위적인 기공을 형성한 세라믹 담체로 바뀌어가고 있다. 하지만 천연 원료로만 사용하게 되면 가격이 높아지기 때문에 폐기물을 이용하여 담체를 제조하는 연구가 진행되고 있다. 물라이트 세라믹스는 알루미나와 실리카가 주성분으로 고융용온도(1828°C), 저밀도, 저열팽창계수, 저열전도율의 특성을 가진다. 성분상으로 볼 때 물라이트는 폐기물중에서 알루미나와 실리카를 포함하고 있는 것을 혼합하여 열처리함으로써 얻어질 수 있다. 물라이트계 세라믹 담체의 장점으로서 기공의 분포 및 크기의 제어가 용이하고 산알카리, 고온 고압 및 내마모성이 강하며, 미생물 고정용이하고 2차 폐기물이 발생되지 않는 것이다. 담체는 폐기물 원료를 가소성 폴리머와 혼합하여 담체를 성형한 후 1200°C 이상에서 열처리하여 제조된다. 알루미나와 점토의 양을 조절함으로써 큰 기공과 그 안에 작은 기공이 존재하는 구조를 얻을 수 있고, 45% 이상의 기공율을 가지게 된다. 현재는 폐기물을 사용하여 운전 특성에 적합하도록 담체를 설계하여 제조할 수 있는 수준에 이르렀다.

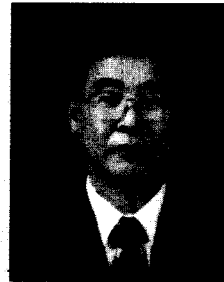
4. 결 론

과거 국내 도자기 산업은 전통도자기, 생활도자기, 건축도자기 그리고 공업용 도자기로 나누어져 각각의 용도에서만 활발하게 연구가 수행되어졌다. 뿐만 아니라 천연 원료만을 사용하여 제품을 제조함으로써 인하여 질 좋고 풍부하던 원료들이 부족하게 되어 매장량이 풍부한 중국으로부터 수입하는 실정이다. 국·내외적으로 폐기물의 재활용에 관심을 가지게 되었고, 천연 원료를 대체할 수 있는 무기계 폐기물에 관심을 가지게 되어 활용에 대한 연구가 수행되었다. 그 결과 천연 원료와 폐기물계 원료를 적절하게 혼합하여 사용하게 되었으며, 순수용도가 아닌 환경에 접목하는 시도가 활발하게 이루어지고 있다. 지속적인 연구가 수행되어진다면 국내 폐기물 원료의 재활용 뿐만 아니라 수입대체 효과도 얻을 수 있을 것이고 나아가 다양한 분야에 적용할 수 있는 기술을 축적하게 되어 도자기 산업의 발전에 큰 효과를 줄 수 있을 것이다.

참고 문헌

1. 환경부 환경 백서, 1998.
2. D. H. Cha, "Economy-ecology balance of Taejon city municipal solid waste management by LCA and WRAP", MS Thesis, KAIST, 1998.
3. 산업자원부, 2010년의 산업기술 예측과 장기 발전 전략.
4. K. Scott and R. Hughes, "Industrial Membrane Separation Technology", in Chap. I, Blackie Academic & Professional, UK(1996).
5. 김준수, 조철구, 하호관, "Ceramic Membrane에 의한 환경 오염 방지 기술", 요업 기술, 1995.
6. Y. S. Lin and A. J. Burggraaf, "Preparation and Characterization of High-Temperature Thermally Stable Alumina Composite Membrane", J. Am. Ceram. Soc., 1991.
7. K. P. Kumar, V. T. Zaspalis. F. F. M. De Mul, K. Keizer and A. J. Burggraaf, "Thermal Stability of Supported Titania Membranes Mater. Res. Soc. Symp. Proc., 1992.

8. Bitton, G., Wastewater Microbiology, John Wiley & Sons, INC., New York, 1994.



오유근

- 1972년 전남대학교 무기재료공학과 공학사
- 1975년 마산도자기 시험소
- 1983년 공업연구사
- 1983년 충남지방 중소기업청
- 1987년 공업연구사
- 1988년 한양대학교 무기재료공학과 공학석사
- 1989년 기술표준원, 공업연구관
- 1999년
- 2000년 명지대학교 무기재료공학과 공학박사
- 2000년 요업기술원 수석연구원
- 현재



정훈

- 1994년 국립경상대학교 무기재료공학과 공학사
- 1996년 국립경상대학교 무기재료공학과 공학석사
- 1996년 한국과학기술연구원
- 1997년 위촉연구원
- 2002년 한양대학교 무기재료공학과 공학박사
- 2000년 요업기술원 위촉연구원
- 현재



황광택

- 1992년 한양대학교 무기재료공학과 공학사
- 1994년 한양대학교 무기재료공학과 공학석사
- 1997년 한양대학교 무기재료공학과 공학박사
- 1997년 한국과학기술연구원 Post-Doc.
- 1997년 산업기술시험원 위촉선임
- 1998년 연구원
- 1998년 Lawrence Berkeley
- 1999년 National Lab., Post-Doc.
- 2000년 요업기술원 선임연구원
- 현재