

# 파인 세라믹스의 조성 분석

임창호 · 김영만

생산기술연구원 부설 산업기술시험평가연구소, 한국과학기술연구원 특성분석센터

## 1. 서 론

소재의 조성은 파인 세라믹스의 특성을 결정하는 가장 중요한 요소이다. 전자 세라믹스와 같은 기능성 재료에서 원하는 기능을 얻기 위하여는 정확한 조성의 설계에 따른 원료의 배합, 소성과 함께 출발원료의 엄격한 조성의 관리가 필수적이다. 특히 고 기능성의 요구 특성을 맞추기 위하여 출발원료가 점점 더 고순도화 됨에 따라 관리되는 불순물의 농도도 ppm 수준으로 낮아지게 되었고 이러한 극미량 불순물의 관리를 위한 선결 조건으로 정확한 분석 방법의 개발이 필요하게 되었다.

파인 세라믹스는 금속소재나 고분자소재에 비하여 개발 역사가 짧고 활용 분야도 전자재료를 중심으로 한 기능성 재료 및 내열 및 강도가 요구되는 구조재료 등으로 아직은 제한적이기 때문에 조성분석 방법에 대한 연구도 미흡한 실정이다. 따라서 대부분의 파인 세라믹스 소재에 대한 분석 방법으로 전통요업소재에 사용하는 분석방법을 사용하고 있는데 이러한 분석 방법으로는 정밀, 정확한 분석이 불가능하다.

그 이유는 첫째, 전통요업 소재에 비하여 고순도의 파인 세라믹스는 산이나 알칼리에 대하여 매우 안정하므로 화학 분석을 위한 시료 처리가 기존의 방법으로는 어렵기 때문이다. 예를 들면 일반순도의 알루미늄이나 알칼리 용융법을 사용하거나 황산과 인산의 혼산을 사용할 경우 상압하에서도 쉽게 용해되지만 99.5% 이상의 저소다급 알루미늄의 경우는 가압 조건에서 20시간 이상 가열하여야 완전히 분해시킬 수 있다. 마찬가지로 페로프스카이트계 산화물 중 티탄산바륨과 티탄산스트론튬의 경우도 일반 순도의 경우 상압하에서 염산 용매를 사용하여 쉽게 분해되지만 고순도급 이상은 가압용기를 사용하여야 분해가 가능하다.

둘째, 소재 내에 ppm 수준의 극미량 원소를 정량하기 위하여는 ICP 방출 분광기나 질량 분석기와 같이 감도가 좋은 측정 장비를 사용하여야 하며, 소재 및 원소에 따라서는 이온교환 분리법이나 용매 추출법, 공침 분리법 등의 방법을 사용하여 측정 결과에 영향을 줄 수 있는 매질을 분리, 제거하고 분석 원소를 농축시키는 preconcentration 과정을 거쳐야 하기 때문이다. 반면에 전통 요

업소재의 분석에 사용되는 대부분의 방법은 이러한 분리 및 농축의 과정이 필요 없고, 사용되는 측정 장비도 감도 보다는 신속성에 초점을 맞추고 있기 때문이다.

파인 세라믹스 중 미량 원소를 분석 할 경우 또 하나 중요하게 고려하여야 할 점은 적은 오염에 의하여도 분석 결과가 크게 달라지게 되므로 분석 수행시 오염원이 혼입되지 않도록 주의하여야 하며, 따라서 분석 절차가 되도록 간편하여 오염의 혼입 및 우발오차의 발생을 최소화시켜야 한다는 점이다.

본 소고는 파인세라믹스의 조성분석 방법에 대한 국내·외의 기술 현황과 소재별 분석 방법을 간단하게 소개하므로써 분석자가 목적에 맞는 적절한 분석 방법을 선택하여 정밀, 정확하고 보다 신속하게 분석값을 얻는데 도움을 주고자 하였다.

## 2. 기술 현황

파인 세라믹스의 조성 분석에 대한 연구 방향은 크게 두가지로 나눌 수 있다. 하나의 연구 방향은 화학적인 방법에 의하여 시료를 용액화 시키는 과정이 매우 어렵고 시간이 많이 걸리는 단점이 있으므로 시료의 분해를 거치지 않고 분말 또는 성형체를 직접 분석할 수 있는 방법에 대한 연구이다. 이러한 직접 분석 방법은 분석 시간이 획기적으로 단축된다는 점 외에도, 시료의 분해 과정에서 불완전한 분해나 불순물의 혼입 등 우발 오차의 요인을 제거 할 수 있는 장점이 있다.

다른 하나의 방향은 분해가 어려운 소재를 보다 신속하고 완벽하게 분해시키는 방법에 대한 연구이다. 이러한 방법은 전자의 방법처럼 신속하지는 못하지만 정확도와 정밀도, 그리고 감도는 훨씬 탁월한 방법으로 정밀 분석이 요구되는 경우에 적합한 방법이다.

### 2-1. 직접 분석 방법

파인 세라믹스 중 가장 많은 종류가 사용되는 산화물은 화학적으로 매우 안정하여 산이나 알칼리 등의 용매에 의하여 잘 분해되지 않으며 높은 열과 압력을 가하여 시료를 분해 시킬 경우에도 분해 속도가 느려서 단 1g의 시료

를 분해 시키는데에도 수십 시간에서 수일이 걸리는 경우도 있다. 또한 기계적 강도도 매우 높기 때문에 성형체의 경우는 시료의 분쇄가 대단히 어렵다. 더욱이 고순도 소재의 경우는 분쇄 과정에서 아주 작은 양의 불순물만 혼입 되어도 커다란 분석 오차가 발생하게 된다.

따라서 이러한 분쇄 및 분해 과정을 거치지 않고 분말이나 성형체를 직접 분석할 수 있다면 파인 세라믹스의 분석에 유용할 것이다. 이미 오래 전에 개발되어 전통 요업 소재의 분석에 사용되고 있는 X-선 형광분석법(X-ray Fluorescence Spectrometry), Optical-Emission 분석법 및 중성자 방사화 분석법(Neutron Activation Analysis) 등이 이러한 목적으로 사용될 수 있는 방법이며, 최근 파인 세라믹스의 직접 분석을 목적으로 연구되고 있는 방법은 RF-GD 원자 방출 분광법 또는 원자흡광법이 있으며 또한 ICP 방출 분광기나 ICP 질량 분석기에 laser ablation 장치를 결합시켜 분말 및 성형체 시료에 조사하거나, electro thermal vaporization 장치를 장착하여 발생된 vapor를 플라즈마 속에 주입시키는 방법도 점차 보편화 되고 있다. 이 밖에 특수한 주입 장치를 통하여 분말 시료를 slurry 상태로 플라즈마 속에 직접 주입시키는 방법도 활발히 연구되고 있는데 이러한 연구 동향을 아래에 간단히 소개 하였다.

**2-1-1. ICP를 이용한 직접분석법에 대한 연구**

ICP 방출 분광법의 단점인 시료 주입법을 개선하여 용액 시료가 아닌 분말 또는 성형체 시료를 플라즈마에 직접 주입하므로써 이 방법의 가장 큰 장점인 좋은 감도와 정밀도를 살리면서도 신속한 분석이 가능한 방법이 개발되었다. 즉 ICP 방출 분광기 또는 ICP 질량 분석기에 laser ablation이나 electro thermal vaporization 장치를 붙여서 분말 및 성형체 시료를 직접 분석하는 방법으로 특히 laser ablation을 이용하는 방법은 국소 부위 분석(Micro Analysis)이 가능하기 때문에 특정 부위의 분석과 조성의 공간 분포, 오염원의 추적 및 Failure Analysis등 다양하게 활용이 가능한 방법이다.

Laser ablation 장치는 시료를 밀폐된 시료화 장치에 넣고 laser를 조사시켜 발생된 vapor를 아르곤 gas를 흘러주므로써 플라즈마 속으로 주입시키도록 되어 있다. 또한 원하는 부위를 관찰하면서 laser를 조사시킬 수 있도록 CCD 카메라 렌즈 및 모니터가 장착되어 있고, 원하는 부위를 찾을 수 있도록 시료 stage는 X, Y, Z 방향으로 이동이 가능하다. Laser source로는 주로 Nd-YAG가 사용되고 있는데, 공간 분해능을 향상 시키고 보다 깨끗한 crater를 얻기 위하여 기존의 IR laser에서 최근에는 UV laser가 많이 이용되는 추세이다. Yanagisawa 등은 Laser-ablation ICP-Mass(LA-ICP-MS)를 이용하여 질

화규소와 도자기 표면을 분석하였으며, Broekaert 등은 LA-ICP-MS를 이용하여 산화물 연료전지 부품 중 세라믹 층(La<sub>0.65</sub>Sr<sub>0.3</sub>MnO<sub>3</sub>와 이트륨-안정화 지르콘(YSZ))을 분석하였다.

Slurry injection을 이용하여 원료 분말을 Ar 플라즈마 속에 직접 분무하여 분석하는 방법도 활발히 연구되고 있다. 이 방법은 기존의 ICP 방출 분광기에 특별히 고안된 nebulizer를 장착하여 slurry 상태의 분말을 플라즈마에 직접 주입하는 것으로 이때 사용되는 nebulizer는 기존의 concentric nebulizer나 crossflow nebulizer에 비하여 시료가 분무되는 orifice의 직경이 크고 V-groove 형태로 되어 있어 입자 크기가 10 μm 정도의 분말도 분무가 가능하다. 이 방법은 기기의 modification이 적고 간편하게 분석이 가능하므로 난용성의 미세한 분말의 분석에 유용하다. 재현성 있는 분석 결과를 얻기 위하여는 플라즈마에 주입되는 slurry가 균질한 상태를 유지하여야 한다. 균질한 slurry를 얻기 위한 방법은 시료를 물 또는 기타 용매와 섞고 약 10~30분 정도 초음파 처리를 하는 것이며, 이러한 상태를 유지하기 위해서는 용매의 산도와 분산제의 종류 및 양이 적절히 선택되어야 한다. Graule 등은 이 방법을 사용하여 알루미늄, 질화 알루미늄, 질화규소, 탄화규소 및 ZrO<sub>2</sub> 등에 포함된 Al, B, Ca, Co, Cu, Fe, Mg, Mn, Si과 Ti을 미량까지(ng/g~g/g) 정량하였는데, 입자의 직경이 10 μm 이내에서는 만족한 결과를 얻었다고 보고 하였다. 국내에서는 임 흥빈 등이 알루미늄과 산화철 시료 중 미량 원소를 Slurry 직접주입/ICP 방출 분광법으로 정량하여 가압 산 분해 후 ICP 방출 분광법에 의한 분석 결과와 비교하였는데 서로 일치되는 결과를 얻을 수 있었다.

Laser ablation이나 slurry injection 방법은 모두 ICP 방출 분광기나 ICP 질량 분석기의 측정 unit을 그대로 사용하므로 이 방법들의 장점인 좋은 감도와 정밀도를 살릴 수 있으면서 분말이나 성형체 시료를 직접 분석한다는 점에서 상당한 이점이 있고 앞으로 난용성의 파인 세라믹스의 분석에 이용이 기대되는 방법이다.

**2-1-2. X-선 형광 분석법을 이용한 파인 세라믹스의 분석**

전통적인 직접 분석 방법 중 Optical-Emission 분석법은 감도와 정밀도가 떨어지므로 정량 분석(Quantitative Analysis)에는 적합하지 못하고 미지의 시료에 대한 일차적인 정보를 얻기 위한 정성분석(Qualitative Analysis)에 주로 사용되며, 중성자 방사화 분석법은 감도가 매우 뛰어나지만 시료가 방사선을 방출하도록 원자로에서 조사시켜야 하므로 보편적으로 활용되는 방법은 아니다. 따라서 위에 소개한 방법 중 파인 세라믹스의 조성 분석에 가

장 널리 쓰이는 방법은 X-선 형광 분석법이다.

X-선 형광 분석법은 원자번호 11번인 Na에서 92번 U까지의 넓은 범위의 원소를 분석 할 수 있는 방법으로 정밀도가 좋아 정량 분석에 적합한 방법으로 전통 요업 소재의 분석에 가장 많이 사용되고 있는 방법이다. 이 방법은 감도도 비교적 좋기 때문에 고순도의 파인 세라믹스의 분석에도 활용이 가능하다. 문헌에 보고된 검출한계는 원소에 따라 ppm 이하까지도 검출이 가능한 것으로 되어 있지만 실제 정량 분석이 가능한 범위는 경원소의 경우 20 ppm 내외, 그리고 감도가 좋은 원소는 5 ppm 정도라고 보는 것이 타당할 것이다. 최근에는 B부터 분석이 가능한 검출기가 개발되었지만 실제로 이러한 검출기를 사용하여도 이 들 원소의 검출한계는 200 ppm 이상으로 파인 세라믹스의 분석에는 아직 효과적으로 활용되지는 못하고 있다.

이 방법의 또 하나 커다란 단점은 매질 영향(matrix effect)이 크다는 점이다. 이 때문에 정량 분석을 하기 위하여는 분석 시료의 매질과 거의 일치되는 조성을 갖고 농도 값이 정확히 검정된 기준물의 Group을 사용하여 검량선을 작성하여야 한다. 검량선 작성 및 측정을 위한 시료화 방법은 압축 성형법(pelletizing method)과 유리 비드법(glass bead method)이 주로 쓰이지만, 이 밖에도 시료에 따라 공침법(coprecipitation)이나 박막법(thin film) 등도 사용된다. 丸田俊九 등은 자체 제작한 기준물을 사용하여 고순도 Mullite 중 주성분과 미량성분을 동시에 정량하는 방법을 제안하였으며, 국내에서도 김영만 등은 자체 제작한 기준물을 사용하여 티탄산바륨 중 주성분과 미량성분을 동시에 정량하였다. 두 연구에서 시료화 방법은 모두 유리 비드법을 사용하였는데 이 방법은 백금 도가니에 시료와 용제를 넣고 섞어서 용융 시킨 뒤 mold에 부어 비드를 만드는 것으로 용융 상태에서 백금 도가니를 흔들어서 주므로써 조성이 균질하게 분포 된다는 장점이 있으므로 파인 세라믹스의 분말 시료 중 미량 원소의 분석에 특히 유리한 방법이다.

화합물의 X-선 형광 스펙트럼은 대단히 복잡하고 에너지의 크기가 비슷한 여러개의 복사선이 발생하므로 원소 간 간섭(interference)이 일어날 수 있다. 따라서 정확한 분석값을 얻기 위해서는 이러한 간섭을 제거 하여야 하는데 간섭의 제거 방식은 미리 실험을 통하여 얻어진 보정 계수(empirical coefficient)를 이용하여 측정된 신호 세기 중 분석 원소에 의한 세기와 간섭에 의한 세기를 분리하는 것으로, 연산 방식에 따라 Lucas Tooth법, Traill-Lachance법 등의 여러 가지 방법이 사용되고 있으며 Klimasara는 이 두가지 algorithm에 대하여, Rousseau는 fundamental parameter법과 이론적인 계수에 의한 연산

방법을 비교 연구하였다.

### 2-1-3. 기타 직접 분석법

전도체인 금속 소재의 분석에 한정하여 사용되던 글로우 방전 분석법을 비전도체인 세라믹스 소재의 분석에 활용하기 위한 연구도 활발하다. 그 이유는 글로우 방전 분석법은 정밀도가 좋고 검량선이 직선을 나타내는 농도 구간이 넓으며 매질에 의한 영향도 비교적 적은 방법이기 때문이다. 연구되고 있는 방법은 고순도의 구리, 은, 또는 흑연 등을 세라믹스 시료와 함께 혼합한 뒤 압력을 가하여 원통형 pellet으로 만든 후 Grimm형 방전관을 사용하여 시료를 분석하는 방법이 있다. 또 다른 방법으로는 RF를 이용한 글로우 방전에 의하여 시료를 분석하는 방법 등이 있는데 아직은 감도와 정밀도가 낮아서 파인 세라믹스의 분석에 실용화 되지는 못하고 있다. Winefordner 등은 글로우 방전 원자 방출법과 원자 형광법, 그리고 Microwave plasma atomic absorption spectrometry에 대한 review paper에서 이들의 원리와 응용 분야에 대하여 설명하였다.

이 밖에 증성자 방사화 분석법은 감도가 뛰어나서 극미량 원소까지 분석이 가능하지만 원자로에서 분석 시료를 방사화 시켜야 한다는 점에서 파인 세라믹스의 분석에 널리 사용되지는 못하고 있으며 Optical-Emission 분석법은 정밀도가 떨어지므로 정량 분석용으로 사용은 힘들지만 시료 처리가 간단하므로 미지 시료에 대한 정성 분석용으로 많이 사용되던 방법이다. 그러나 최근에는 시료 처리가 간편하면서도 보다 정밀도가 좋은 다른 방법들이 개발되므로 점차 사용 빈도가 줄고 있는 방법이다.

### 2-2. 화학적 분석 방법

화학적 분석 방법에 의하여 시료를 분해시키는 경우에는 소재의 종류에 따라 적절한 분해 방법을 찾는 것이 가장 중요하다. 파인 세라믹스의 분해에 적용할 수 있는 분해 방법은 알카리 용융법, 상압 분해법 및 가압분해법이 있고 최근에는 Microwave Digestion을 이용한 방법도 연구되고 있다. 분해방법은 소재별로 최적의 방법이 선택되어야 하는데 예를 들면 상압 산 분해법은 대부분의 파인 세라믹스의 분해에 그다지 효과적이지 못하지만 산화철의 경우에는 상압 하에서 염산을 가하여 가열하므로써 쉽게 분해가 가능하다. 반면에 고순도 알루미늄의 경우에는 황산을 가하여 가압 분해하는 방법 이외에는 다른 어떤 방법으로도 쉽게 분해되지 않는다.

시료를 분해시킬 때 또 하나 고려하여 주어야 하는 것은 분해 용매나 용제에 의한 바탕값 상승 및 매질의 영향, 그리고 오염에 의한 영향이다. 산 분해 방법은 정제한 무기산을 사용할 경우에는 바탕값 상승이나 매질영향, 그리

고 오염을 최소화 시킬 수 있지만 알카리 용융법을 사용할 경우에는 용제의 양이 시료량의 3~20배에 달하므로 시료 용액을 측정할 때 바탕선 상승과 매질에 의한 영향을 반드시 고려하여 주어야 한다. 이와 함께 용제가 포함하고 있는 불순물에 의한 오염도 주의하여야 하는데 Na, K, Ca 이나 Li 화합물 등 대부분의 알카리 용제는 비교적 많은 양의 Si와 Al 등을 포함하고 있다.

이와 함께 신속성 및 조작의 편의성도 고려하여야 하는데 예를 들면 산 분해 방법은 알카리 용융법에 비하여 시료를 분해 시키는데 소요되는 시간이 길고 가압 용기를 사용하지 않는 상압 조건에서는 분해 정도도 떨어지는 단점이 있다. 가압 산 분해 방법은 분해가 가장 완벽한 방법이지만 고온, 고압의 조건에서 분해 시켜야 하므로 가압 용기를 다룰 때 안전사고 등에 조심하여야 하며, 소재별로 최적 조건을 찾아야 한다. 반면에 알카리 용융법은 분해가 신속하고 비교적 많은 양의 시료를 분해 시킬 수 있다. 또한 거의 동일한 실험 조작으로 여러 종류의 세라믹스 소재를 분해 시킬 수 있으므로 미량 원소의 정량이 요구되지 않는 경우에는 알카리 용융법이 가장 널리 사용되고 있다. 각 방법에 대하여 아래에 좀 더 자세히 소개하였다.

**2-2-1. 알카리 용융 분해**

알루미늄의 분해에 가장 많이 사용하고 있는 방법으로, 이 방법은 시료를  $Na_2CO_3$  또는  $Li_2CO_3$  등의 알카리성 용제와 함께 백금도가니에 넣고 전기로에서 900°C 정도로 가열하여 용융시키므로써 가용성 나트륨이나 리튬의 염을 만들고 가용성 용융물을 산으로 용해시키는 방법이다. 이 방법은 일반적인 산처리에 의하여 시료를 분해시키기 힘든 경우에 사용하는 방법으로 용제와 함께 boric acid를 첨가하여 분해효과를 높이기도 한다. 이 방법은 신속하게 시료를 분해시킬 수 있고 비교적 많은 양의 시료를 분해시킬 수 있다는 장점이 있지만 반면에 다음과 같은 문제점이 있다.

첫째, 시료를 분해시킬 때 시료량의 5~10배에 해당하는 양의 용제와 3~5배 정도의 boric acid가 첨가되는데 이렇게 많은 양의 시약이 사용되므로 시약에 의한 오염의 우려가 있다. 또한 용융 및 용융물의 분해가 여러 단계를 거치므로 이 과정에서 오염이 발생할 가능성도 많다. 이 외에도 많은 양의 용제를 사용하기 때문에 분해된 시료 용액을 ICP나 AAS를 이용하여 측정할 때 용제에 의한 매질영향을 크게 받게 되므로 정확한 분석을 하기 위하여는 검량선 용액을 시료용액과 같은 매질이 되도록 하여 주어야 하는데 그 과정이 다른 방법에 비하여 번거롭다. 또한 바탕선 값이 상승되므로써 신호/잡음비가 감소하여 미량 원소를 분석하기가 어렵게 되는 경우가 발생한다.

둘째, 백금도가니에서 철이 용출되어 나오므로 정량결

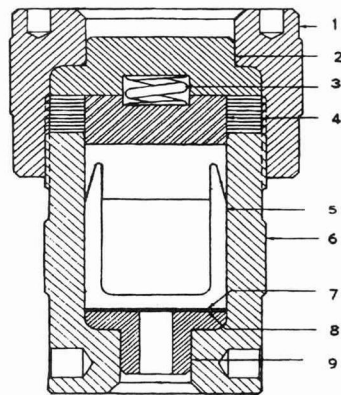
과에 영향을 줄 우려가 있다. 일부 문헌에 의하면 최초 사용시 다량의 철이 용출되나 반복 사용한 백금도가니에서는 이러한 문제가 제거되는 것으로 보고하고 있지만 다른 문헌에서는 10번 이상 사용한 백금도가니에서도 상당량의 철이 백금도가니에서 용출되어 나온다고 보고하고 있다. 따라서 미량 농도의 철을 정량할 때는 적합하지 못한 방법이다.

Harada 등은 고순도 알루미늄 중 미량 불순물의 분석을 위하여  $Na_2CO_3$ 와 boric acid를 사용하여 시료를 용융시키고, 염산으로 용융물을 용해시킨 다음 다시 공침분리 조작을 하여 매질을 제거한 뒤 용액을 ICP 방출 분광법으로 분석하였다. 공침 분리 조작은 zirconium hydroxide를 사용하였는데 Fe, Si, Ca, Mg, Cu, Mn, Zn, Cr, Ni 과 Ti 을 Al 매질 및 용제와 분리하므로써 미량 농도까지 정량하였다고 보고하였다.

**2-2-2. 가압 산 분해**

가압 용기를 이용한 가압 산 분해는 시료를 밀폐된 용기에 넣고 가열하므로써 용기 내에 발생된 증기압을 이용하여 고온, 고압하에서 시료를 분해시키는 방법이다. 즉 용매가 가열되어 증기가 발생하고, 밀폐된 용기 내에서 발생된 증기에 의한 증기압 상승으로 비점 상승이 일어나게 되므로 상압 하에서보다 용매는 더 높은 온도까지 도달되고 이에 따라 난용성의 시료를 분해할 수 있게 된다. 가압 용기는 여러 가지 모양이 시판되고 있는데 반응 용기는 열 및 화학적으로 안정한 테프론 용기가 사용되고 반응 용기를 감싸는 외부 용기는 산에 의한 부식에 안정한 스텐레스강 또는 니켈이 주로 사용되는데 일반적인 구조는 그림 1과 같다.

이 방법은 분해가 가장 완벽하여 질화규소, 탄화규소



**그림 1.** 가압용기의 단면도.  
 1. 바깥덮개    2. 상부덮개    3. 용수철  
 4. 가압관    5. 테프론 반응용기    6. 용기몸체  
 7. 부식방지판    8. 파손방지판    9. 하부홈

및 산화지르콘과 같이 분해가 어려운 파인세라믹스의 분해에 최근 가장 널리 사용되는 방법이다. 또한 정제가 간단한 무기산만을 사용하여 시료를 분해시키기 때문에 시약에 의한 오염이 없고 ICP 발출분석법과 원자흡광분석법 등을 이용하여 시료용액을 측정할 때에도 바탕선 값의 상승과 매질에 의한 영향을 최소화시킬 수 있다. 시료 처리 조작이 간단하여 분석시 우발오차를 줄일 수 있다는 장점이 있으며 모든 시료처리 조작이 밀폐된 용기안에서 행해지므로 외부 환경에서 오염원의 혼입도 줄일 수 있다. 따라서 분해가 어렵고 불순물의 함량이 낮은 고순도 소재의 분석에 가장 적합한 방법이다.

Forner는 자체 제작한 가압 용기를 사용하여 calcined alumina 미분말, fused alumina 분말(30~60 mesh), 재결정 알루미늄 편(5 mm×5 mm×2 mm) 및 사파이어를 분석하였는데 조건은 염산 용매를 사용하여 260~350°C에서 14 시간에서 80시간까지 가열하였다. Uwamino 등은 지르코니아와 알루미늄을 가압 산 분해 방법으로 분석하였으며, 임창호 등은 티탄산바륨, 티탄산스트론튬 및 PZT 등 페로프스카이트계 산화물과 알루미늄 등을 이 방법으로 분석하였다.

그러나 이 방법은 시료량에 제한을 받으며 고압이 걸리므로 사용시 주의하여야 하는데 용매에 따른 증기압을 미리 예측하여 용기의 내압 이상으로 압력이 걸리지 않도록 하여야 한다. 용기의 내압은 가압용기의 종류에 따라 약 1,000 psi에서 5,000 psi까지 다양하다. 또한 반응용기는 대부분 테프론으로 만들어지므로 테프론의 연화점 부근인 250°C 이상으로 장시간 가열하는 것을 피하여야 한다.

**2-2-3. 마이크로파를 이용한 분해**

가압 분해법이 장시간이 걸리는 단점을 개선하기 위하여 최근에는 microwave를 이용한 가압용기가 개발되어 보급되고 있다. 이 방법은 마이크로파에 의하여 시료 분자 내에 쌍극자 회전과 이온 전도에 의한 운동에너지를 발생시키고, 이웃한 분자들과의 충돌에 의하여 발생된 열에 의하여 시료를 분해시키는 방법이다. 이 방법은 시료 용기에 의한 열 손실이 없고 열 전달과는 달리 마이크로파가 전달되는 시료 전 범위에서 회전 및 운동에너지가 발생되므로 매우 빠르게 시료를 분해시킬 수 있다는 장점이 있다. Tanimoto 등은 이 방법을 사용하여 질화규소와 탄화규소를 분해시킨 후 ICP 발출 분광법 및 원자 흡광 광도법으로 분석하였고, Tatar 등은 알루미늄 시료를 분해시켰으며 Matusiewicz는 알루미늄, 질화규소, AlN와 BN의 분해에 사용하였다.

그러나 아직은 사용 내압이 낮고 일반 가압용기에 비해 가격이 비싸다는 단점이 있고 안전성의 문제가 완전히 해결되지 않은 상태이다. 또한 이를 이용한 분석방법의 개

발이 무기 시료의 경우에는 미흡하기 때문에 보편화에는 더 시간이 필요한 실정이다.

이 밖에 상압분해법은 가장 간편한 방법이지만 분해 속도가 느려서 파인세라믹스와 같은 난용성 시료의 분해에는 잘 사용하지 않는 방법이다. 알루미늄의 분해에는 비점이 높은 황산과 인산의 혼산을 사용하여 비교적 높은 온도에서 가열하여 시료를 분해시키지만 고순도의 알루미늄은 완전히 분해되지 않으므로 최근에는 잘 사용되지 않는 방법이다.

**3. 소재별 조성분석 방법**

국내 파인 세라믹스 소재의 수요는 약 80% 정도가 전자 세라믹스로서, 전자세라믹스의 비중이 매우 크다. 그 중에서 가장 널리 사용되는 것은 기판과 packaging material 등으로 사용되는 알루미늄과 유전성 및 압전성 재료로 사용되는 페로프스카이트계 산화물 소재, 그리고 자성 페라이트 등이다. 이들 소재의 화학 분석 방법에 대하여 간단히 소개한다.

**3-1. 알루미늄의 분석**

알루미늄은 파인세라믹 소재 중에서 가장 오래 전부터 광범위하게 쓰여 온 소재이며, 주요 용도로는 고결연성, 고강도 및 고내열성 등이 요구되는 세라믹 실장재료, IC 기판, 저항체 코어, 고압램프용 튜브 등이며 이 외에도 투광성소결체, 인공 뼈 등 생체재료 그리고 절삭공구 등으로도 사용된다.

α-알루미늄은 대표적인 난용성 소재이며 더우기 소재의 순도가 높아질수록 난용성은 증가하게 된다. 최근에는 전자산업의 발달과 아울러 소재의 고 기능성의 요구에 따라 α-알루미늄의 순도도 99.9~99.99% 이상의 고순도 소재의 활용이 늘어나는 추세이며 이에 따라 소재의 분해가 더욱 어렵게 되었고 관리하는 불순물의 농도도 더욱 낮아짐에 따라 측정 방법도 더욱 정밀,정확한 방법을 찾게 되었다. 현재까지 제안된 방법 중 시료를 분해시킨 뒤 감도가 좋은 ICP 발광분석법이나 원자흡광법 등을 사용하는 것이 가장 정밀하고 정확한 분석이 가능하지만 이를 위하여 먼저 적절한 분해 방법을 찾는 것이 중요하다. 알루미늄의 분해 방법은 상압에서 산처리에 의한 분해방법, 가압용기를 이용한 산분해 방법, 알칼리 용융법, 그리고 마이크로파를 이용한 분해 방법 등이 사용된다. 문헌에 발표된 파인 세라믹스용 알루미늄 분말의 분석방법 중 화학분석에 의한 방법을 표 1 및 표 2에 요약하여 수록하였다.

이러한 방법 중 고순도 알루미늄의 분석을 위하여 가장 효과적인 분해 방법은 가압 산 분해 방법으로 황산(1:3)

표 1. 파인 세라믹스용 알루미늄의 분석방법(가압분해)

분해 방법	시료처리 조작	비 고	인용문헌
가압 산 분해	황산(1+4) 15 ml, 220°C, 1시간		(11)
가압 알칼리 분해	KOH 30%, 220°C, 4시간		(11)
가압 알칼리 분해	NaOH(10%), 20 ml, 220°C, 24시간	시료 0.5 g, Zr 공침분리	(11)
가압 산 분해	황산(1+3) 10 ml, 230°C, 16시간	소결체 시료 1편(약 0.3 g)	(12)
가압 산 분해	황산(1+2) 10 ml, 230°C, 16시간	시료 0.5 g	(13)
가압 산 분해	황산(1+1) 3 ml, 200°C, 10시간	시료 0.25 g, 23 ml 용기	(14)
가압 산 분해	진한황산 15 ml, 180°C, 16시간	시료 0.1~0.5 g	(15)
가압 산 분해	황산(1+3) 10 ml, 260°C, 14시간	시료 0.5 g	(16)
가압 산 분해	진한염산 260°C, 14시간	자체 제작 Bomb 사용	(17)

표 2. 파인 세라믹스용 알루미늄 분말의 분석방법 (기타 방법)

분해 방법	시료 처리 조작	인용 문헌
알칼리 용융	- 시료 1 g, Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> , 붕산 1 g, - 500°C 30분, 1000°C 30분 용융 - 용액을 ICP-AES로 측정 (Ca, Cu, Mg, Mn, Na, Si)	(18)
상압 분해 (인산/황산)	- 시료 1 g, 인산 12.5 ml, 황산 15 ml - 300°C 30분 가열(석영 비커 사용) - ICP-AES로 측정(Fe)	(19)
상압 분해 (인산/황산)	- 시료 0.4 g, 인산 15 ml, 황산 6 ml - 300°C, 약 30분 가열 - Fe 측정	(18)
상압 분해 (인산/황산)	- 시료 0.2 g, 인산 2 ml, 황산 3.5 ml - 50 ml로 희석 - Flame Photometry 측정	(20)
알칼리 용융/ Zr 공침분리/ ICP 측정	- 시료 1 g, Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 2.5 g, 붕산 1.0 g - 900°C 10분 - 6 M 염산 20 ml, 물 20 ml - 시럽상까지 가열 - 물 20 ml로 용해 - 공침분리 조작	(21)

또는 황산(1:4)를 용매로 230°C에서 16~30시간 가열함으로써 1g 시료를 완벽하게 용액화시킬 수 있다. 시료를 분해하는데 황산만을 사용하므로 분해된 용액은 시료 자체의 함유 원소 이외에 오염원의 혼입이 없고, 따라서 ICP 방출 분광법이나 원자 흡광법 등으로 정확한 측정이 가능하다. 그러나 일부 원소는 측정시 매질의 영향을 받

는 것으로 알려졌다. 즉 알루미늄 농도가 증가 할수록 Na, Ti, Fe 및 Si 등의 방출 세기가 감소함이 확인 되었는데 이러한 매질 영향을 제거하기 위하여 표준물 첨가법을 사용하거나, 검량선 용액에 시료 용액과 같은 농도가 되도록 순수한 매질을 첨가하는 방법을 사용한다.

### 3-2. 페로프스카이트계 산화물의 분석

페로프스카이트계 산화물은 알루미늄과는 달리 원료분말 자체의 불순물 뿐 아니라 소재에 특성을 부여하기 위한 첨가원소에 대한 관리가 중요하다. 원료분말에 적절한 첨가제를 가하고 배합하므로써 소재의 유전성, 압전성, 반도체성을 변화시킬 수 있으며 이와 같은 특성 때문에 강유전체와 압전체, PTC용 소재, 그리고 압전체 등으로 다양하게 쓰이고 있으며 그만큼 다양한 조성을 갖는다.

티탄산바륨은 ABO<sub>3</sub>형 페로프스카이트 복합산화물로서 큐리점(Tc 120°C) 이상에서는 상유전상(paraelectric phase)인 cubic 구조를 형성하나 큐리점 이하의 온도에서는 강유전성을 띠는 tetragonal 구조를 형성한다. 강유전체인 티탄산바륨 세라믹스는 높은 유전 상수를 가지며 열에도 안정하여 세라믹 캐패시터의 재료로 사용된다. 티탄산바륨 원료분말에 적절한 첨가제를 가하여 소결하므로써 큐리점을 이동시킬 수 있는데 Ba<sup>2+</sup>의 일부를 같은 원자가를 갖는 Pb<sup>2+</sup>, Sr<sup>2+</sup> 및 Ca<sup>2+</sup>로 치환 시키고, Ti<sup>4+</sup>의 일부는 Zr<sup>4+</sup>, Sn<sup>4+</sup>와 Hf<sup>4+</sup> 등의 원소로 치환되는데 이러한 첨가제를 shiftor라 부른다. 티탄산바륨은 큐리점 부근에서 매우 큰 유전율을 가지므로 이러한 shiftor를 이용하여 큐리점을 상온 부근으로 이동시켜 주면 상온에서 좋은 유전체가 된다. 이 밖에도 유전율의 온도 의존성을 낮추기 위하여는 Ca과 Mg 등의 원소를 첨가하여 주며 반대로 큐리점에 서의 저항 변화율을 증대 시키기 위하여는 Mn, Fe, Cu 등의 원소를 첨가시켜 준다. 한편 순도 99.99%의 순수한 티탄산바륨 분말에 La, Ce 등의 희토류 산화물을 가하여 소성하면 상온에서 저항율이 10<sup>3</sup>~10<sup>5</sup> Ω·cm의 원자가

제어 반도체가 얻어진다. 한편 불순물로 존재하는 Si와 Ti는 PTC 특성에 영향을 주는 입자크기와 분포의 제어에 직접 영향을 주게 된다.

SrTiO<sub>3</sub>도 BaTiO<sub>3</sub>와 마찬가지로 적절한 첨가제를 가지고 반도체화 하므로써 결정의 입계나 계면을 이용한 세라믹콘덴서로 사용되는데 유전율의 온도특성이 안정하고 주파수 변화에 따른 유전손실의 용량변화가 작아 고주파용 유전체재료로 각광받고 있다. PZT는 압전체재료로 널리 사용되는데 Pb(Zr<sub>x</sub>Ti<sub>1-x</sub>)O<sub>3</sub>의 기본조성을 가지며 PbZrO<sub>3</sub>와 PbTiO<sub>3</sub>가 특정한 조성비(몰비 53:47)를 가질 때 상전이가 일어나고 유전율과 전기기계결합계수(electro-mechanical coupling factor)도 극대가 되는 것으로 알려져 있다. 상전이와 관련하여 일어나는 이러한 이상현상은 온도의존성이 적으므로 넓은 온도범위에 걸쳐 좋은 압전체재료로 사용된다. 이러한 기본조성에 약간의 Sr(Zr-Ti)O<sub>3</sub>와 니오브산염 등을 첨가하여 특성을 개선시키기도 하며 Pb의 일부를 La으로 치환한 PLZT는 투광성이 큰 전기광학소재로 사용된다.

페라이트계 산화물의 조성 분석은 다음과 같은 특징이 있다. 고순도 티탄산바륨 및 티탄산스트론튬의 원료분말은 Na, Al, Si 등의 불순물을 관리하는데 농도 범위는 대략 100~1,000 ppm 정도이다. 반면 PTC용 소재와 같이 특정한 특성을 얻기 위하여 첨가물을 가하는 경우 첨가물은 농도 범위가 수 %~수백 ppm 정도로 비교적 함량이 높다. 첨가물로 Zr 및 Nb 등 난용성 희토류 산화물이 첨가 되는 경우에는 화학 분석을 위한 시료 처리, 즉 용액화가 대단히 어렵다.

따라서 이러한 소재를 분석 할 때는 X-선 형광 분석법이 유용하다. 이 방법은 ICP 방출 분석법이나 원자 흡광 분석법에 비하여 감도가 떨어지지만 시료를 용액으로 만들 필요가 없으므로 시간이 단축되며 정밀도가 좋아서 특히 난용성 시료의 분석에 효과적으로 사용 될 수 있다. 그러나 앞서 설명한대로 X-선 형광 분석법은 매질에 의한 영향이 매우 크므로 검량선 작성용 기준물의 개발이 우선 되어야 한다. 임창호, 김영만 등은 PTC용 티탄산바륨과 압전체로 사용되는 PZT를 분석하기 위한 기준물을 개발하여 보급하고 있다.

화학분석에 관련된 보고로는 Sato 등은 티탄산바륨 시료를 가압 산 분해 방법으로 분해하여 ICP 방출 분광법으로 분석 하였는데, 염산 용매를 사용하여 140°C에서 1시간 가열, 30분 교반하는 과정을 4번 반복하므로써 0.5g까지의 시료를 분해하였다. 김진태 등은 0.2g 시료를 염산 하에서 140°C에서 2시간 가압 분해하므로써 티탄산바륨을 용해하였다. 임창호 등은 티탄산바륨과 티탄산스트론튬에 대하여 순도별, 소재별로 분해 방법을 확립하여 표

준 분석법으로 제안하였다.

### 3-3. 기타 소재의 분석

$\alpha$ -산화철은 페라이트의 제조에 주로 사용되므로 페라이트용 산화철이라고 불리우기도 한다. 페라이트는 산화철을 주성분으로 하여 여기에 Mn, Zn 등의 2가 금속을 한 두가지 첨가하여 제조하는데 이때 고체간에 반응을 촉진하거나 결정성장을 제어하기 위한 목적으로 미량첨가물을 가한다. 인위적으로 가한 미량 첨가물과 산화철의 제조과정에서 혼입된 미량불순물은 페라이트의 물성에 커다란 영향을 주게 되므로 엄격하게 관리되어야 하는데 특히 경질 페라이트에 비하여 연질페라이트에서는 0.001% 이하의 미량 불순물도 물성에 큰 영향을 줄 수 있다. 그 중에서도 자성특성에 가장 큰 영향을 주는 것은 SiO<sub>2</sub>로서 농도가 증가할수록 투자율은 감소하게 되는데 SiO<sub>2</sub>의 함량이 100 ppm 부근에서 급격한 감소 경향을 나타내므로 미량까지 관리되어야 한다.

현재 SiO<sub>2</sub>의 분석에 활용되는 방법은 중량법과 흡광광도법이 있는데 각 방법의 개요는 다음과 같다. 먼저 중량법은 시료를 염산과 질산으로 분해한 뒤 과염소산을 가하여 산화탈수 시키고 잔유물을 여과한다. 500°C로 가열하여 여과지를 탄화시키고 다시 1000°C에서 항량까지 태워준다. 이때 생성된 잔유물은 SiO<sub>2</sub>와 그 밖에 불용성 화합물인데 여기에 HF를 가하여 SiO<sub>2</sub>만을 선택적으로 휘발시킨 다음 무게를 단다. 감소된 무게는 SiO<sub>2</sub>의 무게이므로 시료 중 SiO<sub>2</sub>의 함량을 구할 수 있다. 이 방법은 신뢰도가 높은 방법이지만 100 ppm 정도의 미량 SiO<sub>2</sub>를 정량하려면 30~50g 정도의 많은 시료량이 필요하고 시간도 많이 소요되므로 고순도 산화철의 분석에는 적합하지 못하다.

다음으로 흡광광도법은 시료를 염산으로 분해 한 뒤 과염소산으로 산화탈수 시킨 뒤 침전을 탄산나트륨으로 용융 분해한다. 이 용액에 몰리브덴산 암모늄용액과 환원제를 가하여 생성된 몰리브덴 청의 흡광도를 파장 800 nm 부근에서 측정하는 방법으로 중량법에 비하여 시료량이 10g 정도로 작고 감도도 비교적 좋은 방법이다. 그러나 이 방법도 상당히 많은 분석시간이 소요되며 또한 발색조건 등을 정확히 유지시켜야 하는 등 시험절차가 까다롭기 때문에 숙련자가 아닌 경우 우발오차의 요인이 많고 장시간이 소요된다는 단점이 있다.

최근 산화철의 요구되는 순도가 높아지고 SiO<sub>2</sub>의 함량도 30 ppm 이하까지 관리됨에 따라 연질페라이트용  $\alpha$ -산화철을 대상으로 미량 SiO<sub>2</sub>의 정량에 적합한 정밀도를 가지면서도 신속하게 시료를 분석할 수 있는 분석방법의 표준화가 요구되고 있는데 임창호 등은 시료를 염산으로 분해 한 뒤 ICP 방출 분광분석법을 이용하여 Si, Na, Ca,

표 3. 파인 세라믹스의 분석 방법

대상 시료	분석 방법	인용문헌
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 분말	마이크로파 가열 산 분해	(24, 25)
AlN 분말	마이크로파 가열 산 분해	(24)
BaTiO <sub>3</sub> 소결체	가압 산 분해	(26)
BN 분말	마이크로파 가열 산 분해	(24)
Mullite 분말	가압 산 분해	(27)
Mullite 분말	마이크로파 가열 산 분해	(28)
PZT 소결체 분말	가압 산 분해	(29)
PZT 소결체 분말	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 분해, 황산 백연처리	(29)
PZT 소결체 분말	알칼리 용융 분해	(29)
PZT 소결체	상압 산 분해	(26)
SiC 분말	알칼리 용융 분해	(30)
SiC 분말	가압 산 분해 후 백연처리	(30)
SiC 소결체	가압 산 분해	(31)
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> 분말	가압 산 분해 후 백연처리	(32)
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> 분말	마이크로파 가열 산 분해	(24)
SiC 소결체	가압 산 분해	(31)
BaTiO <sub>3</sub> 분말	가압 산 분해	(13, 22, 23)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 분말	마이크로파 가열 산 분해	(24, 25)
AlN 분말	마이크로파 가열 산 분해	(24)
BaTiO <sub>3</sub> 소결체	가압 산 분해	(26)
BN 분말	마이크로파 가열 산 분해	(24)
Mullite 분말	가압 산 분해	(27)
Mullite 분말	마이크로파 가열 산 분해	(28)
PZT 소결체 분말	가압 산 분해	(29)
PZT 소결체 분말	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 분해, 황산 백연처리	(29)
PZT 소결체 분말	알칼리 용융 분해	(29)
PZT 소결체	상압 산 분해	(26)
SiCX 분말	알칼리 용융 분해	(30)
SiC 분말	가압 산 분해 후 백연처리	(30)

Mn, Cr, Al, Ni, K, Cu, Zn, P 및 Ti 등을 동시에 분석하였고 이를 표준 방법으로 제안하였다.

이 밖에 문헌에 보고된 파인 세라믹스의 소재별 분해 방법 및 분석 방법을 다음의 표 3에 정리 하였다.

**참고문헌**

1. Broekaert JAC, Graule T, Fresenius Z. Anal. Chem., 1989, 332: 825.
2. Broekaert JAC, J. Anal At Spectrom 1987, 2: 537.
3. Ebdon LE, Cave MR Analyst 1982, 107: 172.
4. 이인식, 임창호, "전자소재 및 재료의 시험 평가기술 개발 (3/5)," 1994.
5. ibid. (4/5), 1995.
6. Hauptkorn S, *Spectrochimica Acta, Part B* 1994, 49B, 221-8.

7. Westheide JT, Becker S, J. Anal At Spectrom 1996, 11: 661-666.
8. Arrowsmith P, Winter Conf. on Plasma Spectrochemistry, San Diego 1988 Abstracts, p. 54.
9. Bennette H, Oliver GJ Trans J Brit Ceram Soc., 1977, 76: 11.
10. Marshall J, Carroll J, J. Anal At Spectrom 1995, 10: 359R.
11. 平手直之, 分析, 1990. 7
12. Uwamino 외, 分析化學, 1991, Vol. 40, T183.
13. 分析, 1991. 6. p. 424.
14. 김택제, 김선태, KIST 연구보고서(초미량 원소 분석에 관한 연구), 1991.
15. 하정목, 분석과학, Vol. 2, No. 2, 1989.
16. 森川 久 외, 分析化學, 1986, Vol. 35, 636-640.
17. Forner H, Anal. Chem., 1984, 56, 4, 856-859.
18. T, Ishizuka, Anal. Chimica. Acta, 1984, 161, 285-291.



19. 파인세라믹스 H/B, 일본통상성, 1986.
20. 山内 文雄, Japan Analyst, 1968, Vol. 17.
21. 原田외, 分析化學, 1986, Vol. 35, 641-645.
22. Sato, M., Hara, H. 외, 分析化學, 1985, 34, T31.
23. Uwamino, Y., 分析, 1996. 3, 205-211.
24. H. Matusiewicz, Mikrochim. Acta, 1993, 111, 71.
25. E. Tatár. I. Varga, G. Záray, Mikrochim. Acta, 1993, 111, 45.
26. Y. Uwamino, H. Morikawa 외, Microchem. J., 1994, 49, 173.
27. Y. Harada, N. Kurata, G. Furuno, Anal. Sci., 1993, 9, 99.
28. 九田俊久외, 分析化學, 1993, No. 243, 88.
29. J. Fariñas, M. Barba, J. Anal. At. Spectrom., 1992, 7, 877.
30. JIS R 1603, 파인 세라믹스용 탄화규소 미분말의 화학분석 방법 (1994).
31. Y. Uwamino, H. Morikawa외, 分析化學, 1992, 41, T 151.
32. JIS R 1603, 파인 세라믹스용 질화규소 미분말의 화학분석 (1994).
33. J. Norris, B. Preston, L. Ross, Analyst, 1992, 117, 3.
34. F. Yokota, H. Morikawa, T. Ishizuka, Analyst, 1994, 119, 1023.
35. R. obiški, J. Broekaert, Fresenius' J. Anal. Chem., 1992, 342, 569.
36. J. Anal. At. Spetrom., 1994, 9, 773.
37. Analyst, 1995, 120, 89.
38. Spectrochim. Acta, Part B, Mar 1994.
39. J. Anal. At. Spectrom., 1994., 9, 707.
40. J. Anal. At. Spectrom., 1994, 9, 841.
41. Spectrochim. Acta, Prt B, 1994, 49, 1251.
42. J. Anal. At. Spectrom., 1994, 9, 1063.
43. Guangpuxue Yu Guangpu Fenxi, 1993, 13(6), 67.
44. ibid, 1994, 1(2), 97.
45. Youkuganye, 1993, 12, 260.
46. Fresenius' J. Anal. Chem., Feb. 1994.
47. Turkish J. Nucl. Sci., 1993, 20(2), 1.
48. Fresenius' J. Anal. Chem., 1994, 349, 434.
49. Guangpuxue Yu Guangpu Fenxi, 1993, 14(2), 79.
50. Bunseki Kagaku, 1994, 43, 351.
51. KS M 1315 산화제이철(페라이트용) (1982).
52. JIS K 1462 페라이트용 산화철(III) (1981).
53. JCRS 104-1993, 파인 세라믹스용 알루미늄 미분말의 화학분석 (1993).
54. KS L 1612 파인 세라믹스용 탄화규소 미분말의 화학분석 방법 (1994).
55. KS L 1613 파인 세라믹스용 질화규소 미분말의 화학분석 방법 (1994).

### 임 창 호



- 1980 성균관대학교 화학과(이학사)
- 1985 성균관대학교 화학과(이학석사)
- 1984 한국표준과학연구원(연구원)
- 1988-현재 생산기술연구원 부설 산업기술시험평가연구소 재료평가팀(선임연구원)

### 김 영 만

- 1973 한남대학교 화학과(이학사)
- 1976 고려대학교 화학과(이학석사)
- 1988 성균관대학교 화학과(이학박사)
- 1990-91 University of Pittsburgh(Post Doctorial)
- 1976-현재 한국과학기술연구원 특성분석센터 책임연구원
- 1982-현재 경희대, 고려대, 연세대 강사