

세라믹 공정에서의 초음파 활용

신현창, 최승철, 이재춘*, 오재희**

아주대학교 기계 및 산업공학부

*명지대학교 세라믹화학공학부, **인하대학교 재료공학부

scchoi@ajou.ac.kr

1. 서 론

인간이 귀로 들을 수 있는 소리의 주파수는 20 Hz ~ 20 KHz로 이를 가청주파수라 한다. 이 가청 주파수 보다 높은 20 KHz이상의 주파수를 일반적으로 초음파라 부르며, 산업용으로 다양하게 활용되어지고 있다.

보통 초음파를 발생시키거나 감지하는 것에는 고주파전압을 수정판에 가해서 공진시키는 수정발진기나, 금속이 자화할 때 찌그러지는 현상을 이용한 자기변형발진기를 사용하는데, 이것으로부터 얻은 초음파는 최고 200억 Hz의 범위까지 이르고 있으며, 반도체를 이용한 초음파발진기도 연구되고 있다.¹⁾

이러한 초음파는 여러 가지 좋은 특성을 가지고 있다. 현재 우리 주변에서는 이러한 특성을 이용하여 초음파로 작동되는 여러 가지 제품들이 많다. 우선 우리 주변에서 가장 많이 볼 수 있는 것이 초음파 세척기와 가습기, 의료진단용 초음파 감지기, TV 리모콘 등이다. 이것들 외에 최근 들어 관심이 많아지고 있는 안전사고 예방에 비파괴 검사가 많이 이용되어지고 있는데 이것 역시 초음파를 이용한 것이며, 어군탐지, 용접, 유량계 등 많은 곳에 초음파가 사용되어지고 있다.

최근에는 초음파를 이용하여 화학반응을 촉진시키는 연구가 활발히 진행되어지고 있으며, 특히 세라믹분야에서도 분말 합성을 중심으로 초음파의 활용에 대한 연구가 증가하고 있는 추세이다. 그러므로 이 글에서는 세라믹 분야의 초음파 연구활용 예를 소개하고, 앞으로의 활용 방향을 논하려 한다.

2. 초음파의 특성 및 일반적인 활용

초음파는 본질적으로는 가청범위의 음파와 성질이 비슷하나, 주파수가 높고 파장이 짧아 강한 진동이 생기므로 보통의 소리에서는 볼 수 없는 성질이 나타난다. 음파란 에너지의 전파이므로 초음파에 의해 전달되는 에너지를 이용하여 접합, 가공, 세정, 분무, 화학반응 촉진 등을 시킬 수 있다. 한편 음파의 전파속도는 매질의 물성 및 상태에 따라 결정될 수 있으므로, 초음파를 계측용 신호로 이용하여 비파괴검사, 유량계, 수중탐사 및 지질탐사, 어군탐지, 의료진단 등에 사용되어지고 있다.

초음파의 큰 특징 중 하나는 공동현상(空洞現象, cavitation)이다. 일반적으로 액체는 그 액체의 종류, 온도, 압력에 따라 상당량의 기체를 용해시키고 있다. 용해된 기체는 분자모양으로 되어 액체분자 사이에 들어간다. 이와 같이 기체를 다량으로 포함한 액체 중에 초음파를 조사하면, 초음파는 압력의 변동으로 전해지므로 초음파 음장내에서는 압력의 증감이 일어난다. 초음파의 강도를 강하게 하면, 감압시 액체를 가르는 힘이 작용하게 되어 공동이 발생한다. 이 미세한 기포는 감압측의 반주기에서는 팽창하여 주위 액체로부터 기체나 액체의 증기를 받아들이고, 반대로 증압측의 반주기에서는 수축하면서 속의 기체를 용해시키거나 액체 증기를 응축(액화)시킨다. 기포는 진동하면서 평균 직경을 증대시켜 진폭도 커진다. 최후에는 큰 직경에서 단번에 압쇄(壓潰)하므로 큰 충격파를 일으킨다.

이 충격파는 큰 압력을 발생시킴과 동시에 발생한 기포의 계면이 소멸되면서 순간적으로 고열을 발생시키는데, 이러한 작용으로 인하여 매질 내의 여러 가지 물리·화학

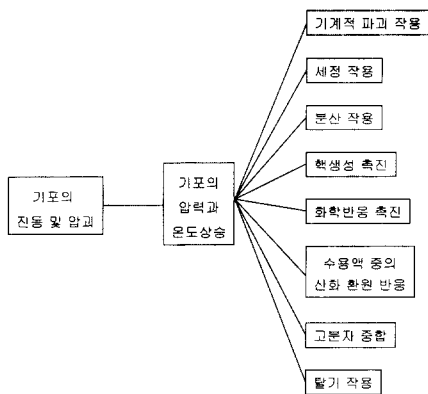


Fig. 1. Application of ultrasonic using cavitation.¹⁾

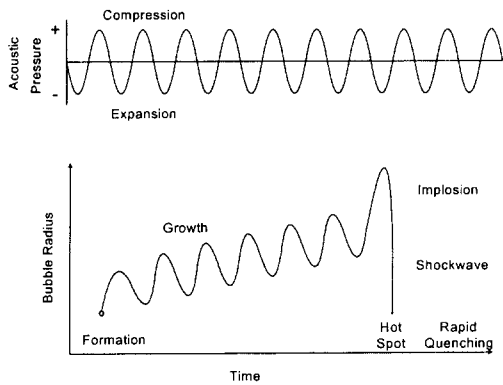


Fig. 2. Cavitation by ultrasonic wave.²⁾

적 작용을 촉진시킨다.²⁾

K. S. Suslick은 이 공동현상을 이용하여 비정질 금속과 합금, 나노 콜로이드 입자 등을 합성하고 금속입자들의 표면을 매끄럽게 만들거나 입자들간의 응집현상을 보고하였다.²⁾

초음파의 응용에는 공동현상에 의한 작용을 이용한 것과 그 외의 것으로 분류할 수 있다. 이 중 공동현상에 의해 나타나는 현상 및 응용 분야를 Fig. 1에 나타내었다.¹⁾

초음파에서는 또한 아주 큰 압력진폭이 얻어지므로 압축일 경우에는 수백 °C에 달하는 고온이 된다. 그러나 주파수가 매우 높기 때문에 그 고온의 열은 다른 부분에 흐를 겨를도 없이 바로 다음 팽창의 주기가 온다. 이와 같이 1사이클마다 일어나는 고온은 변화가 대단히 빠르므로 실제로는 측정할 수 없지만, 1사이클 전체를 통해 보아도 결국 어

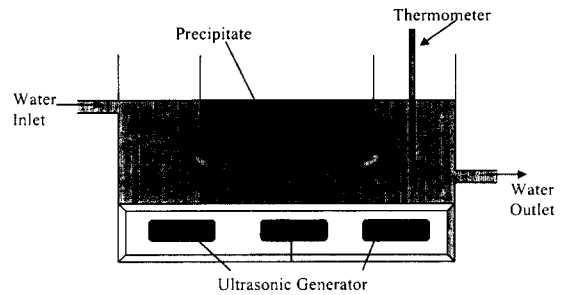


Fig. 3. Ultrasonic experimental apparatus for crystallization of ferrite powders.³⁾

는 정도씩 에너지가 소비되고 그 열량은 축적되어간다. 특히 금속봉을 공진시킬 경우, 그 절부에 압력변동이 집중되기 때문에 이 부분에서 발열이 강하게 일어나 절부가 국부적으로 가열된다.

이러한 초음파의 여러 특성을 이용하여 여러 가지 제품으로 초음파는 많이 활용되어지고 있다. 최근에는 초음파를 이용하여 화학반응을 촉진시키는 연구가 활발히 진행되어지고 있으며, 특히 세라믹분야에서도 분말 합성을 중심으로 초음파 분산 등 초음파의 활용에 대한 연구가 조금씩 증가하고 있는 추세이다. 그러므로 이 글에서는 세라믹 분야에서의 초음파 연구활용 예를 소개하고, 앞으로의 활용 방향을 논하려 한다.

3. 세라믹 분야에서 초음파의 활용 예

3.1 페라이트 분말 제조에서의 초음파 효과

H. C. Shin 등은 공침법으로 제조된 슬러리에 초음파를 조사하여 페라이트 분말을 결정화시키는 연구를 행하였다.^{3,4)} 일반적으로 공침법은 고상반응법에 비하여 조성이 균일하며, 순도가 높고, 졸-겔법에 비해 비교적 공정 변수가 적다는 장점을 가지고 있다. 그러나, 공침법에 의해 제조된 침전물은 대부분이 비정질상이어서, 원하는 구조의 분말을 합성하기 위해서는 하소와 같은 열처리 공정이 필요하다. 용액내 초음파를 조사할 경우 공동현상에 의해 국부적으로 고온의 열이 발생하는 현상을 이용하여 페라이트 분말을 결정화시키는 연구이다.

공침법을 이용하여 페라이트 슬러리를 제조한 후, Fig. 3에서와 같이 38.5 KHz의 최대 270 W의 용량을 갖는 초음

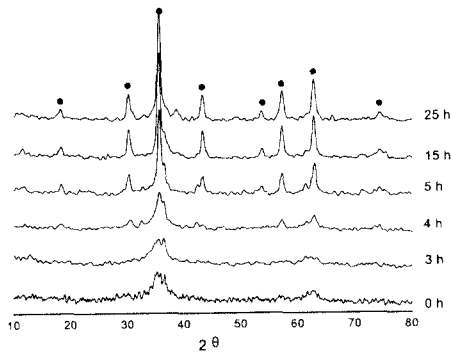


Fig. 4. XRD patterns of the prepared powder for various ultrasonic wave exposing time : ● NiFe₂O₄.³⁾

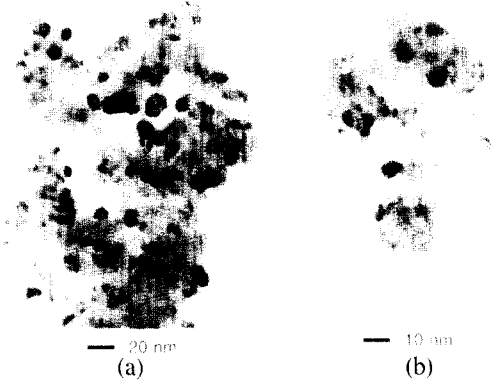
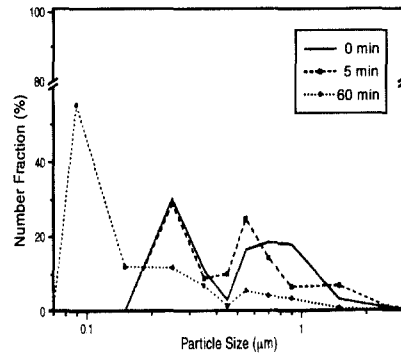


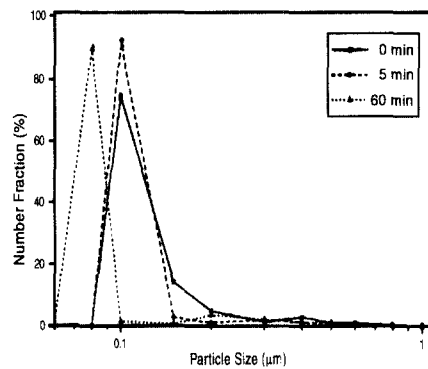
Fig. 5. TEM images of ferrite powder prepared without(a) and with(b) ultrasonic treatment⁴⁾;
(a) raw ferrite powder calcined at 500°C for 2 h
(b) ferrite powder irradiated ultrasonic for 25 h.

파를 조사하여 조사시간에 따른 페라이트 분말의 결정화를 연구하였다. 그 결과 Fig. 4에 나타난 것 같이 초음파를 조사하지 않은 분말은 비정질 상태였으나, 5시간 초음파를 조사한 분말부터 결정화가 진행되는 것을 보고하였다. 페라이트 분말의 결정화는 초음파 조사시간이 증가할수록 향상되었으며, 25시간 초음파를 조사한 페라이트 분말은 500°C에서 2시간 동안 열처리를 한 분말보다 결정화가 우수하게 나타났다. 특히, 초음파를 조사하여 제조된 분말은 30 nm 이하의 초미세 페라이트 분말(Fig. 5)이었으며, 일반적으로 제조된 분말보다 비표면적이 넓고, 하소 온도도 낮추는 우수한 특성이 나타나는 것으로 보고하였다.

일반적으로 세라믹 분말을 제조하는데 있어서 가장 많이 사용되어지고 있는 방법이 고상반응법과 액상법이다. G. J.



(a)



(b)

Fig. 6. Particle size distribution of Mn-Zn ferrite powders prepared with ultrasonic irradiation time.: (a) solid-state reaction and (b) alcoholic dehydration.³⁾

Lee 등은 고상반응법으로 합성한 페라이트와 액상법 중 하나인 알콜탈수법으로 제조한 페라이트에 강력한 초음파 에너지를 조사하여 초음파가 세라믹 미분체에 미치는 영향을 연구하였다.⁵⁾ 이 연구에서는 제조된 페라이트를 물과 혼합시켜 현탁액을 제조한 후, 25 KHz, 100 W/cm²의 초음파를 이용하여 현탁액에 조사하였다. 그 결과, 초음파는 상변화에는 영향을 미치지 못했지만, 조사시간이 증가함에 따라 입자의 평균크기가 작아지고, 분포도가 입자크기가 작아지는 쪽으로 움직임(Fig. 6)을 보고하였다.

3.2 초음파 여기 페라이트 플레이팅법

산화물 자성체인 스피넬 페라이트는 전자기적 기능을 가진 재료로서 자기기록 등의 전자 및 통신부품으로 광범위하게 이용되고 있다. 기존에 사용되어지고 있는 페라이트 소

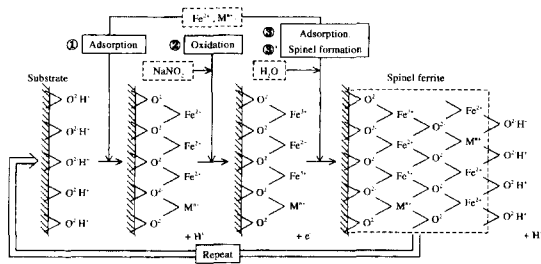


Fig. 7. Principle of ferrite plating using aqueous $Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$ oxidation.¹¹⁾

자는 벌크 형태가 대부분이었으나, 전자통신 분야의 경박단소화 및 고성능화로 인하여 박막 및 후막형태의 소자연구가 급속히 진행되고 있다.^{6,7)} 지금까지의 페라이트 박막 기술로는 스퍼터링법, 진공증착법 및 CVD법 등이 있지만, 이러한 방법들은 페라이트의 결정화를 위해 높은 온도를 필요로 하기 때문에 내열성을 가진 기판만 사용할 수 있었다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 연구되어진 방법이 페라이트 플레이팅법이다. 페라이트 플레이팅법은 100°C 이하의 낮은 온도에서 박막을 제작할 수 있기 때문에 플라스틱과 같은 비내열성 물질을 기판으로 사용이 가능하다. 또한 기판의 형상에 관계없이 균일한 두께의 페라이트 막이 얻어지며, 복잡한 장치가 필요하지 않기 때문에 경제적인 측면에서 제작비용을 낮게 할 수 있다는 장점이 있다.⁸⁻¹⁰⁾

100°C 이하의 저온에서 기판 위에 페라이트 막이 형성되는 반응기구는 Fig. 7과 같다.¹¹⁾ -OH기나 -COOH기가 흡착되어 있는 기판에 Fe^{2+} 및 다른 금속이온(M^{2+})이 포함되어 있는 수용액을 흘려보내면 이러한 이온들이 흡착된다. 다음으로 산화제에 의해서 흡착된 Fe^{2+} 이온을 부분 산화시키면, 기판 위에 페라이트 층이 형성된다. 이와 같은 공정이 반복되면서 페라이트 박막이 형성된다.

T. J. Mason에 의하면 강력 초음파를 용액 중에 조사하면 공동현상이 발생하게 되고, 이 공동현상에 의해 hot spot이 형성되어 극부적으로 고온, 고압과 함께 액상 제트류(liquid jet, >100 m/s)가 형성된다.¹²⁾ 이러한 초음파의 효과에 의해 수용액 중에서 이온의 동적 활성도가 증가되어 화학반응을 촉진시킬 뿐만 아니라, 통상적으로 일어나지 않는 화학반응과 물리반응이 가능하게 된다. 또한 박막 표면에 흡착된 페라이트 입자는 액상 제트류에 의해 제거되

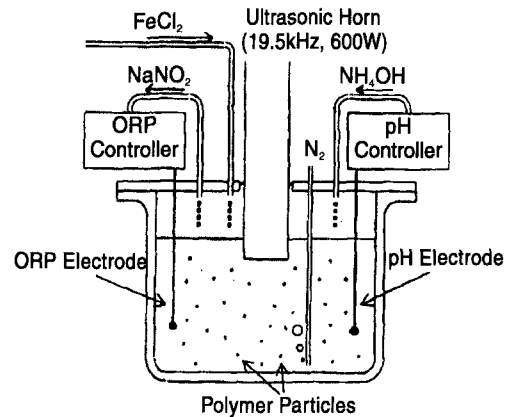


Fig. 8. Apparatus for ferrite plating with ultrasonic on polymer microspheres.¹³⁾

어 박막 표면의 질을 향상시키게 된다.¹²⁾ 그러므로, 최근들어 페라이트 플레이팅법에 초음파 화학을 접목시킨 초음파 여기 페라이트 플레이팅법이 활발히 연구되어지고 있다.

M. Abe 등이 70°C의 온도에서 $FeCl_2$ 수용액으로 지름이 0.25 μm 인 폴리아크릴레이트에 페라이트를 코팅시키는 연구에 사용한 초음파여기 페라이트 플레이팅법의 실험장치도를 Fig. 8에 나타내었다.^{13,14)} 이 그룹에서 사용한 초음파는 19.5 KHz, 600 W의 용량을 갖는 것을 이용하였다. 초음파를 조사한 결과 폴리아크릴레이트 표면에 OH기가 생성되어 페라이트 코팅이 연속적으로 될 수 있었으며, 표면의 질을 향상시켰다. 그러나, 초음파를 조사하지 않고 코팅한 폴리아크릴레이트 표면의 페라이트는 Island 형태로 불완전하게 코팅이 되었다.

D. J. Choi는 기존의 초음파 여기 페라이트 플레이팅법의 장치를 개량하여 유리기판 위에 페라이트막을 코팅하는 연구를 행하였다.¹⁵⁾ 이 장치는 초음파 여기 플레이팅 실험 중에 고주파 초음파를 동시에 인가하여 막을 제조한 것으로 저주파 초음파만을 인가하여 제조한 페라이트 막보다 표면 평활성이 상당히 향상된 것을 보고하고 있다.

3.3 생체재료 제조

인체의 뼈를 대신할 수 있는 인공뼈의 대표적인 것이 Hydroxyapatite ($Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$, HAp)이다. HAp를 합성하기 위한 방법으로 초음파를 조사하여 제조한 경우도 있다.

W. Kim 등은 H_3PO_4 와 $Ca(OH)_2$ 를 함유한 현탁액에 20

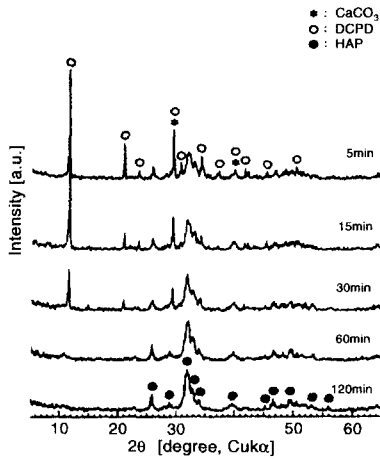
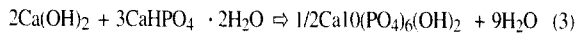
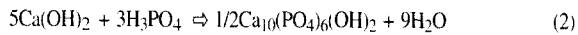
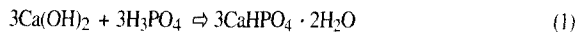


Fig. 9. XRD patterns of the powders from the suspensions sonicated.¹⁶⁾

KHz, 600 W의 초음파를 조사하여 HAp의 제조에 초음파 조사가 미치는 영향을 조사한 결과 초음파 조사시간이 증가함에 따라 다음과 같은 반응이 진행되었다.¹⁶⁾



처음 초음파 조사 30분 동안은 식(1)과 같은 반응이 우선적으로 진행되고, 식(2)와 같은 반응이 일부 진행되었다. 그러나, 60분 이상 초음파를 조사한 현탁액에서는 식(3)과 같은 반응이 진행되어 매우 미세한 HAp 단일상(Fig. 9)이 합성된 것을 보고하였다.

Y. Fang 등은 Ca₄(PO₄)₂O(TetCP)와 CaHPO₄ · 2H₂O (brushite)를 혼합한 수용액에 20 KHz의 초음파를 조사하여 HAp 제조 연구를 진행하였다.¹⁷⁾ 일반적인 조건에서는 25°C에서 9-10시간 교반을 해야 HAp가 형성되지만, 초음파를 조사한 경우 25분만에 HAp가 형성되었다. 또한 38°C에서는 3시간 이상 교반할 때 생성되는 HAp가 초음파 조사시 12분만에 형성되어 초음파 조사가 HAp 형성하는 반응을 촉진시킨다는 결과를 보고하였다. 특히, 이 연구에서는 초음파 조사를 통하여 제조된 분말의 입자 크기가 초음파를 조사하지 않은 경우보다 더 미세한 분말을 얻을 수 있었다. 이들은 또한 α-Ca₃(PO₄)₂ (α-TCP)에 초음파를 조사하여

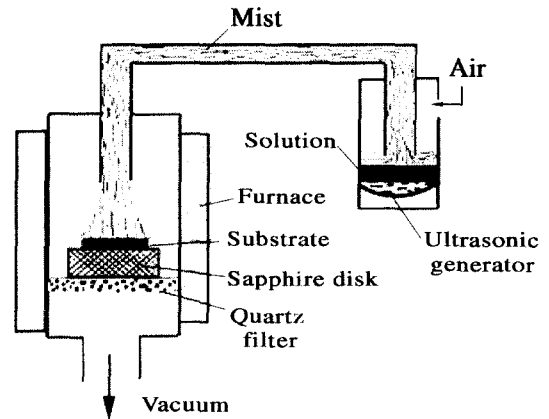


Fig. 10. Ultrasonic spray pyrolysis system for film deposition.²²⁾

가수분해시켜 HAp를 생성시키는 연구를 진행하고 있다. 일반적인 방법으로는 87°C에서 3시간 이상 교반을 해야 HAp가 생성되지만, 초음파를 조사한 경우 45분 이상만 반응하면 HAp가 생성되었다.

3.4 초음파 분무를 이용한 세라믹 분말 합성

초음파를 세라믹 분말 제조에 가장 활발하게 응용되고 있는 것 중에 하나가 초음파 분무 열분해법이다. 이 방법은 수용액을 초음파 분무기로 미세하게 분무하여 전기로에서 짧은 시간에 열분해시키므로 화학조성이 균일하고 결정질이며, 입도분포가 좁은 구형의 미립자이면서 응집이 일어나지 않는 고순도의 이상적인 원료분말을 제조하는 방법이다.^{18,19)}

초음파 분무는 세라믹 진동자에서 발생하는 초음파가 용액의 표면에 집중되면 용액의 분출이 일어나면서 용액의 표면에 생기는 모세관파(capillary wave)로 인하여 미세한 액적으로 분리되는 원리이다.^{20,21)} 근래에 크기가 균일하고 미세한 구형의 분말을 얻기 위하여 초음파 진동자로 액체의 표면을 진동시켜 구형의 미세한 분말을 제조하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 이 방법은 초음파 진동자의 진동수에 의하여 쉽게 액적의 크기를 조절하고 나아가서는 미분체의 입자 크기를 조절할 수 있는 장점을 가지고 있다.

이러한 장점을 이용하여 N. G. Chaban 등은 Fig. 10과 같은 장치를 이용하여 Li₃Sc_{2-x}Fe_x(PO₄)₃ 분말과 박막을

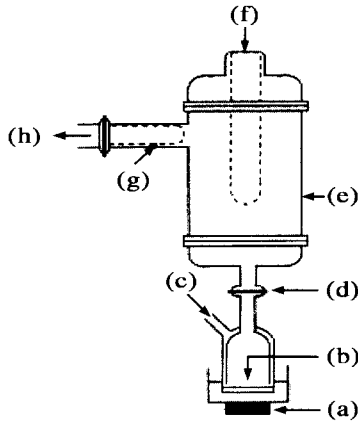


Fig. 11. Chamber chilled by liquid nitrogen.²⁶⁾
 (a) ultrasonic vibrator, (b) aqueous solution, (c) helium gas, (d) ball joint, (e) chamber, (f) liquid nitrogen, (g) test-tube type filter and (h) evacuation.

제조하는 연구를 행하였다.²²⁾ I. Taniguchi 등은 LiNO_3 수용액과 $\text{Mn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 수용액으로부터 LiMn_2O_4 분말을 제조하였고, K. H. Kim 등은 형광체로 사용되는 $\text{SrTiO}_3:\text{Pr,Al}$ 분말을 제조하였다.^{23,24)} Z. B. Zhou는 초음파 분무 CVD 공정을 이용하여 Sn-doped In_2O_3 박막과 F-doped SnO_2 박막을 제조하는 연구를 행하였다.²⁵⁾ 이외에도 초음파 분무 열분해법을 이용하여 여러 복합체의 세라믹 분말이나 박막을 제조하는 많은 연구가 보고되어지고 있다. K. Itatani 등은 Fig. 11와 같은 장치를 이용한 초음파 분무 동결 건조법으로 생체재료로 이용되고 있는 calcium-phosphate 분말을 제조하는 연구를 행하였다.²⁶⁾

3.5 기타

H. L. Choi 등은 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 와 $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 를 이용한 침전반응에서 초음파를 조사한 결과, 침전물들은 PbC_2O_4 와 X 상(미지의 상)으로 관찰되었다. 이 X 상은 초음파를 조사함에 따라 형성이 가속화된다고 보고하고 있다.²⁷⁾

이 그룹은 20 KHz와 1740 KHz의 주파수가 다른 초음파를 사용하여 비정질의 Al-OH와 $\text{Ti-C}_2\text{O}_4\text{-OH}$ 를 결정화시키는 연구도 행하였다. 그 결과, $\text{Ti-C}_2\text{O}_4\text{-OH}$ 에서는 20 KHz의 초음파가 조사될 때에는 $\text{Ti}_2\text{O}_2(\text{C}_2\text{O}_4)(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 의 생성이 촉진되는 효과를 볼 수 있었으나, 높은 주파수에

서는 다른 상이 관찰되었다.²⁸⁾

Al-OH는 초음파를 조사하면 bayerite의 생성이 감소하였고, 결정화도 기계적으로 교반할 때 보다 낮았다. 이와 같은 원인은 초음파를 조사하게 되면 핵생성이 촉진되어 결정상으로 성장하는 것을 방해하기 때문이라고 보고하고 있다.

그 외에도 알루미늄 분말의 합성에 초음파를 이용하여 제조하는 연구도 행하여지고 있다.²⁹⁾ 기존의 알루미늄 분말 제조는 주로 bauxite로부터 Bayer법으로 제조되고 있지만, 대체 원료로써 카올린과 같은 알루미늄 함량이 낮은 광물로부터 알루미늄을 제조하려는 연구들이 진행되어지고 있다. 카올린으로부터 알루미늄을 추출하기 위해 47 KHz, 130 W의 초음파를 조사하여 반응조건을 동일하게 하여 제조된 재래식 방법과 비교한 결과 초음파를 조사한 경우 다양한 조건하에서 알루미늄의 추출을 촉진시켰다. 특히 초음파를 조사하여 합성된 알루미늄은 재래식법으로 합성된 알루미늄에 비하여 상대적으로 입자 크기가 작고, 비표면적이 큰 특성을 나타내었다.

Sol-gel법에서 초음파의 영향을 연구한 예도 있다.³⁰⁾ Sol-gel법은 부분적 조성의 불균일에 의해 전기적인 특성이 떨어지므로 여러 실험을 통하여 전체적인 중합 구조를 바꾸어 물성의 향상을 위한 연구는 많이 되어왔다.

그러나, 국부적으로 일어나는 불균일화를 균일하게 만드는 것이 어려우므로, 초음파를 이용하여 균일화를 촉진시킨 sol로 PZT 박막을 만든 후, 초음파 처리되지 않은 sol로 제조된 PZT 박막과 비교한 결과 초음파가 조사된 박막에서는 단일상을 얻을 수 있었으며, 그 전기적 특성도 향상된 것이 보고됐다.

초음파를 사용한 세라믹 공정 중 대표적인 것이 초음파 분산이다. 응집된 세라믹 분말이나 슬러리에 초음파를 조사하면 분말이 잘 분산되어 우수한 특성을 나타낼 수 있다. H. S. Kim 등은 닥터블레이드를 이용한 PLZT계 경사기능 압전 액튜에이터를 제조에 초음파 분산을 이용하였다. 유기 결합제가 혼합된 닥터블레이드용 슬러리에 초음파를 조사하여 슬러리 내의 입자 응집을 제거하였다. 초음파가 조사된 슬러리를 사용한 결과 균열이 없는 균일한 sheets를 제조할 수 있었다.³¹⁾

4. 맺음말

초음파는 조사 조건에 따라 여러 현상이 나타나며, 이러한 특성을 잘 활용하여 여러 분야에 유용하게 활용하려는 연구가 활발히 진행되어지고 있다. 특히, 화학반응에 초음파를 응용하려는 연구가 활발히 진행되어지고 있으며, 이에 따라 화학분야에서는 이미 중요한 연구 테마로 발전을 하고있다. 그러나, 세라믹 분야에서는 초음파 분무를 이용한 분말제조와 초음파 분산 등을 제외한 반응 제어 분야에서 활발한 연구가 진행되지 않은 상태이다.

그러나, 일부 연구에서 나타난 결과로써 세라믹 분야에도 초음파를 이용하면 일반적인 공정 보다 더 우수한 결과를 얻을 수 있는 것을 확인하였다. 또한 이들의 연구 분야도 세라믹 분말 제조뿐만 아니라, 박막 제조와 막의 질 향상, 저온 합성 등 여러 세라믹 분야에도 초음파의 활용이 가능하다는 것을 보여주고 있다.

현재 초음파를 세라믹 연구에 응용하는 분야가 초기 단계라 할 수 있다. 따라서 활용 가치가 매우 높으므로 많은 연구자들이 세라믹 연구에 초음파의 적절한 활용을 더 연구한다면, 더 발전된 우수한 세라믹 제품을 만들 수 있을 것으로 생각된다.

감사의 글

본 총설은 한국과학재단 특정기초연구(과제번호; 1999-1-301-005-5)의 연구비 지원에 의해 수행된 것입니다.

참고 문헌

- 전자기술연구회, “알기쉬운 초음파 응용” 19-25, 기문사 (1994).
- K. S. Suslicik, “Applications of Ultrasound to Materials Chemistry” *MRS Bull.*, **20**(4), 29-34 (1995).
- 신현창, 오재희, 이재춘, 최승철, “초음파를 이용한 페라이트 분말의 결정화” *한국세라믹학회지*, **37**(2), 181-185 (2000).
- H. C. Shin, J. H. Oh, J. C. Lee and S. C. Choi, “Ultrasonically Accelerated Crystallization Processing for the Nano-size Ferrite Powder.” *Phys. stat. sol. (a)*, **189**(3), 735-739 (2002).
- 이경직, 이대회, 이석기, 이병교 “초음파 에너지가 Mn-Zn Ferrite 분체에 미치는 영향” *요업학회지*, **36**(7), 751-755 (1999).
- J. S. Lee, T. Itoh and M. Abe, “Preparation of Cation-Deficient Magnetite($Fe_3O_{4+\delta}$) Film by the Ferrite Plating Method” *J. Kor. Phys. Soc.*, **28**(3), 375-378 (1995).
- M. Gomi, H. Furuyama and M. Abe, “Strong Magneto-optical Enhancement in highly Ce-substituted Iron Garnet Films Prepared by Sputtering” *J. Appl. Phys.*, **70**(11), 7065-7067 (1991).
- Y. Kitamoto, S. Kantake, F. Shirasaki, M. Abe and M. Naoe, “Low-temperature Fabrication of Co Ferrite Thin Film with High Coercivity for Perpendicular Recording Disks by Wet Process” *J. Mag. and Mag. Mater.*, **193**, 97-100 (1999).
- 오영춘, 오재희, “초음파 여기법으로 제조한 Magnetite 박막의 미세구조 및 자기특성” *한국자기학회 2001년도 춘계연구발표집*, **11**(1), 118-119 (2001).
- 오영춘, 이재욱, 윤용운, 최성형, 오재희, “초음파 여기 페라이트 플레이팅법에 의한 마그네타이트 박막의 제조 및 특성” *한국세라믹학회 2001년도 추계 학술연구 발표회초록집*, 129 (2001).
- M. Abe, “Ferrite-film Formation from an Aqueous Solution and Its Applications, (in Jpn.)” *J. Mag. Soc. Jpn.*, **22**(9), 1225-1232 (1998).
- T. J. Mason, “Sonochemistry: A Technology for Tomorrow” *Chem. Industry*, **18**, 47-50 (1993).
- M. Abe, Y. Kitamoto, K. Matsumoto, M. Zhang and P. Li, “Ultrasound Enhanced Ferrite Plating; Bringing Break through in Ferrite Coating Synthesized from Aqueous Solution” *IEEE Trans. Mag.*, **33**(5), 3649-3651 (1997).
- Y. Kitamoto and M. Abe, “Nanostructured Oxide Films by Ferrite Plating with Sonochemistry” *NanoStructured Mater.*, **12**, 41-44 (1999).
- 최동진, “신 기술에 의한 페라이트 막의 저온 제작과 그 응용에 관한 연구” *전기전자재료학회논문지*, **11**(8), 658-663 (1998).
- W. Kim and F. Saito, “Sonochemical Synthesis of

- Hydroxyapatite from H_3PO_4 Solution with $Ca(OH)_2$ " *Ultrasonics Sonochem.*, **8**, 85-88 (2001).
17. Y. Fang, D. K. Agrawal, D. M. Roy, R. Roy and P. W. Brown, "Ultrasonically Accelerated Synthesis of Hydroxyapatite" *J. Mater. Res.*, **7**(8), 2294-2298 (1992).
 18. 김복희, 이정형, "초음파 분무 열분해 구형 미립자를 이용한 Y-TZP 소결체의 제조" *요업학회지*, **32**(5), 575-581 (1995).
 19. S. Y. Cho, J. H. Lee and S. J. Park, "Preparation of Spherical $Zr_{0.8}Sn_{0.2}TiO_4$ Powder by Ultrasonic Spray-Pyrolysis" *J. Mater. Sci.*, **30**(12), 3274-3278 (1995).
 20. M. Langlet and J. C. Joubert, "The Pyrosol Process or the Pyrolysis of an Ultrasonically Generated Aerosol" 55-79, in *Chemistry of Advanced Materials*, ed. by C. N. R. Rao, Blackwell Scientific Publications, Oxford (1993).
 21. O. V. Abramov, "Ultrasound in Liquid and Solid Materials" 77-91, CRC Press, Florida (1994).
 22. A. K. Ivanov-Schitz, A. V. Nistuk, L. N. Demianets and N. G. Chaban, " $Li_3Sc_{2-x}Fe_x(PO_4)_3$ Thin Films and Powders Prepared by Ultrasonic Spray Pyrolysis" *Solid State Ionics*, **144**, 133-141 (2001).
 23. I. Taniguchi, C. K. Lim, D. Song and M. Wakihara, "Particle Morphology and Electrochemical Performance of Spinel $LiMn_2O_4$ Powder Synthesized Using Ultrasonic Spray Pyrolysis Method" *Solid State Ionics*, **146**, 239-247 (2002).
 24. K. H. Kim, J. K. Park, C. H. Kim, H. D. Park, H. Chang and S. Y. Choi, "Synthesis of $SrTiO_3:Pr,Al$ by Ultrasonic Spray Pyrolysis" *Ceram. Inter.*, **28**, 29-36 (2002).
 25. Z. B. Zhou, R. Q. Cui, Q. J. Pang, Y. D. Wang, F. Y. Meng, T. T. Sun, Z. M. Ding and X. B. Yu, "Preparation of Indium Tin Oxide Films and Doped Tin Oxide Films by an Ultrasonic Spray CVD Process" *Appl. Surf. Sci.*, **172**, 245-252 (2001).
 26. K. Itatani, K. Iwafune, F. S. Howell and M. Aizawa, "Preparation of Various Calcium-phosphate Powders by Ultrasonic Spray Freeze-drying Technique" *Mater. Res. Bull.*, **35**, 575-585 (2000).
 27. H. L. Choi, N. Enomoto and Z. Nakagawa, "Effect of Ultrasonic Irradiation on Precipitation of Lead Oxalate from Aqueous Solution" *J. Mater. Sci.*, **29**, 3239-3242 (1994).
 28. N. Enomoto, H. L. Choi, M. Katsumoto and Z. Nakagawa, "Effect of Ultrasound on Crystallization from Amorphous Gels in Solution" *Trans. Mat. Res. Soc. Jpn.*, **14A**, 777-780 (1994).
 29. 박희찬, 백재현, 김병우, 이상은, 김준호, 박성수, "초음파 조사에 의한 감마 알루미늄 분말의 합성 및 특성에 관한 연구" *한국세라믹학회지*, **38**(10), 921-927 (2001).
 30. 김종국, 박병욱, "초음파 처리된 sol로 제조된 PZT 박막의 미세구조 및 전기적 특성" *한국결정성장학회지*, **9**(1), 101-106 (1999).
 31. 김한수, 최승철, 이전국, 정형진, "닥터블레이드법에 의한 PLZT계 경사기능 압전 액츄에이터의 제조와 압전 변위 특성" *한국세라믹학회지*, **29**(9), 695-704 (1992).