

## 유전, 압전재료의 개발 동향

김 호 기

한국과학기술원 재료공학

### I. 개 요

이동통신 기기시장의 폭발적 증가와 디지털, 멀티미디어화가 급진전되면서 전자세라믹스산업이 급신장하고 있다. 전자기기의 소형, 경량화와 무선 통신기기의 보급증가에 따라 이에 적합한 부품개발이 적극적으로 추진되면서 대기업 중소기업 가릴 것 없이 앞다투어 전자세라믹스기술을 이용한 소재와 응용부품 개발에 박차를 가하고 있어 연간 1조4천억원으로 추정되는 전자세라믹스시장이 한층 열기를 더해가고 있다. 전자세라믹스는 파인세라믹스의 일종으로서 파인세라믹스는 천연연료를 사용한 전통요업제품인 舊 세라믹스와는 달리 「무기물질의 특정 기능, 즉 절연, 내열, 유전(誘電), 반도성, 자성, 광학성, 내마모성을 나타내기 위해 정제원료를 사용, 그 목적에 맞도록 합성해 성형, 소성, 가공한 무기질 제품」으로 과거에 없던 새로운 특성을 나타내는 신세라믹스다.

전자세라믹스는 파인세라믹스시장의 80% 정도를 차지하고 있을 정도로 비중이 크며 단순한 산화물이나 질화물부터 복잡한 화합물까지 여러가지 재료로 만들고 있고 응용부분도 절연체나 기판부터 집적회로나 압전체 부품에 이르기까지 다양하게 사용되고 있다.

전자세라믹스는 원료의 배합이나 소결온도 등에 따라 특성이 달라지는데 특성별로 절연체세라믹스, 자성체세라믹스, 유전세라믹스, 압전세라믹스, 반도성세라믹스 등으로 나뉜다.

유전체세라믹스의 대표적인 응용품으로는 현재 전자부품시장에서 가장 수요가 많은 다층세라믹콘

덴서(MLCC)를 들 수 있다. MLCC는 전자회로의 범용 수동부품으로 전자부품의 소형화, SMD화를 선도하고 있으며, 향후에도 전자기기의 경박단소화와 고밀도 실장기술의 개발에 발맞춰 관련시장 규모가 대폭 늘어날 것으로 전망되고 있다. 그러나 MLCC의 재료인 티탄산바륨( $BaTiO_3$ )과 티탄산스트론튬( $SrTiO_3$ ) 등은 삼성전기 등 일부 업체를 제외하고는 대부분이 일본 등에서 수입해 사용하고 있는 실정이다. 이외에 외부에서 전달되는 많은 무선주파수 중 원하는 주파수대역의 신호만을 걸러 전달하는 유전체 필터와 송수신신호를 분리해주는 듀플렉서도 이동통신기기시장의 성장으로 새로이 각광받고 있는 유전체세라믹스 부품이다.

압전체세라믹스는 전자세라믹스 중에서도 가장 응용범위가 넓은 분야로 단순한 압전점화 유닛, 버저 등으로부터 세라믹발전자, 표면탄성파(SAW) 필터, 압전모터, 압전 액추에이터, 센서에 이르기까지 응용범위가 확대되고 있다. 압전체시장에서 최대시장을 형성하고 있는 압전필터는 지난 95년 5백28억원에서 2000년에는 1천1백58억원으로, 발전자는 95년 1백82억원에서 2000년에는 3백21억원으로 매년 10% 이상의 고성장을 거듭할 것으로 업계에서는 보고 있다.

### II. 유전재료의 개발 동향

일반적으로 유전재료는 물질 내에 외부전계를 인가하였을때 유도전기 쌍극자 모멘트를 가지며 유도분극을 발생시키는 물질을 말한다. 유전체에

전계를 인가하게 되면 ①전자분극, ②이온분극, ③배향자분극), ④계면분극 등의 유전분극을 발생시킨다.

유전재료의 개념에는 절연재료의 개념이 포함되어 있는데 모두가 전기적으로 흐름을 막는다는 것은 분명하지만, 단지 도전성 물질을 분리시키는 역할을 하는 전기적 부도체를 절연재료라 한다면 유전체의 경우는 전계에 의해 유기되는 분극현상이 중요한 작용으로 이루어질 때를 말한다. 또한 유전 특성은 전자 세라믹을 포함한 전자부품 분야에서 커패시터로서의 응용에 기인하여 다양하게 연구되어 왔고, 최근에는 소자의 고주파 이용, 특성 해석 및 응용성에 관련되어 많은 관심이 집중되고 있다.

### 1. Ceramic Capacitor

최근의 전기/전자 산업은 IC와 LSI가 도래하면서 소형화, 고기능화등을 요구하게 되었고, 이는 전자산업의 모든 분야에 있어서 제품의 소형화를 촉진시켰다. 이에 따라 수동소자의 하나인 세라믹 캐패시터 또한 소형화, 고기능화, 복합기능화, 고밀도집적화 등이 요구된다. 최근 조사보고에 의하면 2000년대 전자 부품 수요 시장에서 세라믹캐패시터가 가장 많이 요구된다 한다. 시장 전망이 가장 밝은 품목인 MLCC(적층세라믹콘덴서)는 전자회로의 범용수동부품으로 전자부품의 소형화, SMD화를 선도하며, 현재 시장규모 및 기술수준에서 전자세라믹스 분야의 정상상을 차지하고 있으며, 향후에도 전자기기의 소형화와 고밀도 실장기술의 개발에 발맞추어 관련시장규모도 대폭 늘어날 것으로 전망되고 있다. 다음은 Ceramic Capacitor의 기술발전 동향을 정리해 본 것이다.

#### 1) 소형화

1005형으로 대표되는 적층세라믹 콘덴서(MLCC)의 초소형품은 일본에서는 90년대초부터 휴대폰 및 캠코더에 장착되기 시작하였다. 특히 최근의 휴대전화의 증산으로 사용수량이 대폭적으로 증가한 MLCC는 국내의 경우만 보더라도 몇년전까지 미약했던 총 생산량이 몇개 업체의 생산량을 합치면 월간 15억개가 넘는 큰 규모의 생산능력을 갖추게 되었다. 최대정전용량치의 확대를 위하여

세라믹sheet의 박층화(두께  $5\mu\text{m}$ 이하), 내부전극 인쇄정밀도의 향상(선폭  $200\mu\text{m}$ ), sheet적층시의 정밀도 및 적층수의 증대에 대한 노력이 계속되어 일본 무라타사는 1005의 경우 당초 F특성의 최대용량이  $0.01\mu\text{F}$ 이었던 것이 실제로 기기상에서 가장 많이 사용되어지는  $0.1\mu\text{F}$ 대까지 증가시켜 생산하기에 이르렀다. 국내에서도 기존에  $15\sim 20\mu\text{m}$ 의 세라믹층을 70층까지 적층했던데 비해,  $6\sim 8\mu\text{m}$ 의 세라믹층을 100층 이상 적층해 정전 용량치를 대폭 향상시켰으며, 1608size 에서 F특성으로  $0.68\mu\text{F}$ 까지 생산이 가능하게 되었다. 또한 1005형도 개발이 완료되어 생산중에 있는데, 1608형을 1005형을 바꾸면, 기판점 유면적을 약 60% 감소시킬 수 있으며, 중량도 약 75%의 경량화가 가능하다는 계산이 나오나, 실제로 휴대폰의 경우에는 기판상에서 부품 1개당 약 40%의 실장면적의 감소효과가 있는 것으로 보고되고 있다. 또한 휴대폰의 고주파회로부(RF부)에서는 1005형의 경우가 주파수특성이 좀더 우수하다는 이점도 가지고 있다.

탄탈 전해콘덴서의 동향은 높은 C-V 값을 가지는 탄탈분말의 개발에 의해 2012형이 실현되어 있고 전해질을 이산화망간으로부터 기능성 고분자로 바꾸어 고주파에 있어서 저 impedance화와 고용량화, 높은 허용ripple전류화를 실현한 제품이 일본에서 개발되었다. 알루미늄 전해콘덴서는 내열성과 성능향상을 위해 탄탈 전해콘덴서와 마찬가지로 기능성 고분자나 유기반도체를 전해액 대신으로 사용한 고체형이 개발되었으며, SMD형도 출현한것으로 알려져 있다.

최근에도 MLCC의 경우 0402(무라타)까지 개발되어 실용화단계에 있는 것으로 알려져 있을 정도로 소형화가 계속되고 있으나, 일본의 업계에서도 0402보다 더 소형화가 이루어지기에는 인쇄 및 적층 공정기술과 실장기술의 한계를 지적하고 있다. 아무리 소형의 소자를 제조할 수 있는 공정기술이 개발되었다 하더라도 실장기술이 따라가지 못한다면 소형화의 의미가 없어질것이다. 그래서 수년전부터 일본의 각사에서는 단품소자의 소형화와 더불어 각 단품들의 복합하여 하나의 소자로

〈표 1〉 콘덴서의 소형화 현황 및 추세

품 종	형 태 구 조	특 성
적층 세라믹 콘덴서	소형화 : $2.0 \times 1.25 \rightarrow 1.6 \times 0.8 \rightarrow 1.0 \times 0.5$ 박막화 : $0.7 \rightarrow 0.5 \mu F$ 경량화 : $14 \rightarrow 7 \rightarrow 1.5 mg$ 복합화 : 2연( $2.0 \times 1.25 mm$ ), 4연( $3.2 \times 1.6 mm$ )	고·대용량화, 협용량화, 저왜 내충격성(열, 기계), 고주파용 중고압화( $0.5 \sim 3.14 kV$ )
탄탈 전해 콘덴서	소형화 : $3.5 \times 2.8 \rightarrow 3.2 \times 1.6 \rightarrow 2.0 \times 1.25 mm$ 박막화 : $1.9 \rightarrow 1.6 \rightarrow 1.2 mm$	내열성( $300^\circ C$ 15초) 고내압화( $\sim 50V$ ). 고·대용량화 Fuse내장(소전류해방화)
알루미늄 전해 콘덴서	소형화 : $3.6 \rightarrow 3.0$ 중형(금속case) 박막화 : $5.5 \rightarrow 5.0 \rightarrow 3.0 mm$ 횡치(수지봉지)	내열성( $85 \rightarrow 105^\circ C$ , $260^\circ C$ 10초) 고체화(유기반도체 고분자) 저 ESR, 대용량화, 고내압화

제조하는 복합화 기술개발에 박차를 가해 오고 있다.

## 2) 표면실장기술

최근 전자부품은 전자기기의 소형·경량·다기능화·디지털화 등의 동향과 이에 대한 반응중에서도 표면실장화에의 전환이 현저하다. 주요회로부품은 물론이고 산업용 분야에서의 활용도 폭발적으로 증대하고 있다.

- ① 초고밀도화에 도달하기 위한 초소형화의 지향
- ② 산업전자기기 분야의 전계에 따른 고기능화, 고신뢰성화의 지향
- ③ 실장의 효율화와 면적의 축소를 노리는 복잡화의 지향
- ④ 기존 표면실장에 대응하기 위한 신규 표면실장 기술의 개발

표면실장화의 증대는 소형·정도 실장화만을 대상으로 하지 않고 고주파화·디지털화·EMC 대책 등의 대응에도 유리하여 전자제품에 있어서도 표면실장의 고내·열성·고진동성이 평가되고 있다. 이상과 같은 배경 위에 표면실장의 양적 증대에 따라 가격의 저하, 저가의 장착기 보급 및 표면실장의 노하우 증대로 인해 표면실장은 추후 점차 그 범위와 폭을 넓혀가서 차세대에는 최첨단 전자기기의 중요한 부분으로서 확고한 위치를 가지게 될 것이다.

소형화에 있어서도 3216 타입인 적층 칩 필름

콘덴서, 2520 타입의 코일형 칩 인덕터 및 2012 타입의 페라이트 자기 인덕터 등을 들 수 있다.

탄탈콘덴서는 내습성, 내열 충격성 등의 고신뢰성화를 추구한다.

또한 표면실장의 복합화도 과제의 하나이다. 특히 적층 타입의 것은 CR 네트워크 외에 적층 인덕터 혹은 반도체 칩과의 조합으로부터 여러가지 기능 모델의 발전 가능성을 내포하고 있다.

새로운 표면실장부품으로서는 소형 트랜스·EMI 필터/비드 등의 노이즈 대책부품, 진동자·발전자·표면파 필터 등 세라믹 특수기능부품이 각자로부터 등장, 표면실장 영역은 더욱 다채롭게 전개되고 있다.

## 3) 대용량 세라믹콘덴서

최근의 적층세라믹콘덴서의 제품개발 동향은 소형화와 대용량화를 추구하고 있다. 소형화란 칩 치수 자체의 소형화이며,  $1mm \times 0.5mm$ 의 초소형 칩콘덴서를 각사에서 개발하여 생산하기 시작했다. 대용량화란 일정한 칩 치수에 수용할 수 있는 정전용량 값을 어떻게 크게 하는가이며, 대용량화 정도는 콘덴서의 단위체적당 용량값인  $C/V(F/9cm^3)$ 으로 나타내며, 일부 업체에서는 300에 이르고 있다. 이 값은 10년전에 비해서 약 10배에 이르는 값으로 용량값으로 말하면 칩에서는 47F, 리드타입에서는 100 F까지 실용화되고 있다.

대용량 세라믹콘덴서의 용도는 주로 전원 평활용이며, 소형 고출력의 DC-DC 컨버터 등에 최적

이다. 향후 전원의 소형화·고주파화 및 장수명화가 진행됨에 따라 대용량 적층콘덴서의 수요증가가 예상된다.

대용량 적층세라믹콘덴서를 유전체 재료면에서 보면 고유전율계 유전체 재료로 널리 사용되어 온 티탄산바륨을 대신해서 Pb계 복합 페로브스카이트 복합화합물이 사용되고 있다. 이 재료는 같은 정전 용량의 온도변화율(TCC: Temperature Coefficient Capacitance)에 비하면 티탄산바륨계의 유전체보다 큰 비유전율을 가진다. 또 직류 바이어스 전압에 대한 용량의 감소율이 적은 것과 세라믹스를 구성하는 입자의 크기가 작기 때문에 유전체층을 박층화하기 쉽다. 또한 세라믹스의 소성온도가 1,100°C 정도로 낮기 때문에 고가의 팔라듐 전극을 사용하지 않아도 되는 장점이 있다. 그러나 용량은 전극면적에 비례하고 내부전극으로 사용하는 은의 가격이 고가이므로 납 등의 비금속으로 대체하는 연구가 진행중이다.

이상에서 보면 연계 페로브스카이트 재료는 티탄산바륨에 비해서 유리한 면은 많으나 재료 및 제조 프로세스의 완성에서도 오랜 경험을 가지는 티탄산바륨에 비해서 신뢰성 면에서 개선할 많은 과제를 남기고 있다.

일본의 마르콘전자가 개발한 TCD 시리즈의 유전체 재료는  $Pb(ZnNb)O_3-Pb(MgNb)O_3-PbTiO_3$ 의 삼성분계이며, 이중 Pb 일부를 Ba로 대체한 제품이 있다. 제품 형상으로는 수지 덩다이얼 리드타입의 TCD 시리즈가 있으며, 이제품의 특징은 다음과 같다.

- ① 용량온도에 의한 변화율이 적은 것 및 직류 바이어스 특성이 좋은 것으로부터 실사용시 실효용량이 크다.
- ② 에이징 특성이 좋아 용량의 경시 변화가 적다.
- ③ 절연저항이 높으며, 특히 고온도에서 신뢰성이 높다.
- ④ 유전손실이 작다. 특히 고온일수록 작아지므로 열에 의한 갑작스런 용량상승이 없다.
- ⑤ 적층세라믹콘덴서의 공통적인 특성으로 무극성·장수명·고주파에서 임피던스가 작고 ESR

이 낮다.

## 2. 고주파 유전체

세라믹캐패시터 이외의 유전성 세라믹스로서는, 전자통신기기 산업의 급속한 발전에 힘입어, 유망 품목으로 급부상한 마이크로파 유전체분야가 있다. 마이크로파는 파장이 1m(300 $\mu$ F)이하에서 1mm(300 $\mu$ F)의 전자파를 가리키는 것이다. 마이크로파를 이용한 기기가 점점 활성화되어 자동차 전화, 휴대용 전화 등의 이동 통신과 인공 위성을 사용한 직접 위성방송 등의 뉴미디어에의 실용화로 마이크로파 유전체 세라믹스의 응용이 증대하고 있다. 이에 따라 고주파대역의 유전체재료 및 부품의 개발노력이 미국, 일본, 유럽등을 중심으로 활발히 추진되고 있으며 이에 따라 현재 휴대 전화기 및 차량전화기 등 이동통신 관련기기들이 개발되어 보편화되고 있다. 이동체통신용 부품의 소형화, 고기능화, 저소비 전력화 요구를 만족시킬 수 있는 재료의 하나로서 고주파용 유전체는 단말기 부위의 핵심부품인 Band pass filter, Duplex 및 발진기의 주파수안정화에 적용되고 있으며, 선진국에서도 중점개발되고 있는 분야이다.

세라믹필터는 유전체공진기를 사용하며 고유전율, 저손실, 온도안정, 내진동, 내충격, 소형화, 양산성, 저코스트가 가능하는등 많은 특징을 갖는 필터이다. 세라믹필터는 이동체통신의 안테나공용기를 시작으로 광범위하게 사용되고 있지만 소형화에는 한계가 있다. 그러나 SAW필터의 종래결점인 삽입손실크기, 통과전류의 미소성이 개선되어 있어, RF용으로서의 이용가능성이 증대되고 있다.

일본의 경우, 무라타 제작소는 94년 기준 일본 수요의 50%를 공급하고 있으며, Band pass filter에 강한 마쓰시타 전자부품도 30%를 점유하고 있어 상기 2사가 일본 시장을 독점화 하고 있으나, 후지 전기 화학, 토킨 등 후발 업체도 신제품 개발 등에 노력을 경주하고 있다. 저온 소결 세라믹스를 이용한 적층 칩형 유전체 필터, SMD유전체 필름 등 고성능화, 소형화 및 저코스트화를 유도한 신제품을 개발하여 수요 확대를 도모하고 있다. 국내는 고주파 부품 산업의 개발 여건은 성숙되어 있으나

기술 개발 관련 투자가 미흡하고, 선진국과의 기술 격차가 심하며, 수요업체의 외국 부품 의존도가 높아 거의 대부분 수입에 의존하고 있는 실정이다.

과거 IC화가 되지않아 기기의 소형화, 저가격화에 문제가 있었던 부품으로 공진기가 있었다. 그러나 유전율이 큰 유전체 세라믹스를 사용한 유전체 공진기가 개발됨에 따라 그 높은 유전율과 온도 안정성등으로 이같은 문제가 해결되었다. 특히, 유전체 공진기의 경우 그 유전체의 특성이 직접 공진기 특성을 좌우하므로 통신기기의 소형화와 기능 향상을 위해서는 다음의 3가지 조건이 엄격히 요구된다.

첫째, 높은 유전율( $\epsilon_r$ )을 가져야 하고, 둘째, 높은 Q(Quality factor)를 가질 것, 셋째, 공진 주파수의 온도 안정성( $\tau$ )이 우수할 것 등이다. 높은 유전율화에 의해 사용되는 유전체의 크기는  $\sqrt{\epsilon_r}$ 에 비례하여 소형화될 수 있고, 또한 Q값이 클수록 유전 손실이 작아지므로 유전체 필터로 사용시 대역 통과 특성, 즉 선택도나 S/N비 등이 향상될 수 있다. 그리고 실내·외의 가혹한 조건에서 쓰여지게 되는 통신 기기 부품으로서 급변하는 온도 조건에 대하여 동작 주파수가 일정해야 되는 온도 안정성이 무엇보다도 가장 중요한 요건이다.

그러나 이상 세가지 조건을 두루 갖추는 유전체 재료는 드물며 사용될 주파수대와 주위 회로와의 온도 보상 여부나, 공진기의 용도 분야, 사용 주파수대, 요구되는 크기 등을 고려하여 이에 맞는 유전체 재료를 선택하여 유전체 공진기가 제조 쓰여진다. 특히, 이동통신 분야에서는 기기의 소형화가 강력히 요구되는데, 기기의 소형화를 위해 유전율이 높게 개발된 재료는 Q값이 낮아 그 손실이 커지는 결점이 있으므로 이를 재료 제조 공정의 개선으로 해결하려는 연구가 진행되고 있다. 과거에는 주로 산화물 혼합법으로 제작되는 유전체는 제조 과정중 불순물 등의 유입, 재료 분말의 불균일함, 순도 등에 의한 이상의 생성에 따라 유전손실이 크게 되므로, 이를 해결하기 위해서는 새로운 제조방법이 요구된다.

이같은 해결책으로서 습식 혼합법, 금속 알콕사이드법, 졸-겔법, 급속 승온 소결법 등에 대한 연

구가 진행중이다. 예를 들면  $10\mu\text{F}$ 에서 유전율이 22, Q값이 13,000 정도로 보고된  $\text{Ba}(\text{Mg}_{1/3}\text{Ta}_{2/3})\text{O}_3$ 계 세라믹스 조성을 급속 승온 소결법으로 제조하여 유전율이 25, Q값이  $10\mu\text{F}$ 에서 40,000정도로 개선하였다는 보고가 있다.

또한 MMIC의 개발을 위해 초전도체를 이용한 재료가 연구되고 있는데, 최근 초전도체인  $\text{TiBaCaCuO}$ 계 세라믹스를 이용하여 제작한 유전체 공진기는 그 유전 특성이 크게 향상되어  $77^\circ\text{K}$ ,  $10\mu\text{F}$ 에서 Q값이 3,000,000을 넘는다. 그러나, 급속 알콕사이드법, 졸겔법 등은 알콕사이드 원료의 가격이 높고, 소성시 수축이 크며 수산기의 제거가 곤란하여 미세 기공이 생긴다는 단점이 있다. 또한, 유기 용매의 안정성 여부, 긴 공정 등으로 인해 공장화에 문제가 있다. 하지만 이러한 방법들은 저온 소결이 가능하다는 잇점이 있다. 즉, 이동통신의 유전체 필터 등 유전체 디바이스를 소형화하기 위해 소자의 적층화가 검토되고 있는데, 이의 실현을 위해서는 Ag 등 전극과 동시에 소성이 가능하도록 저온 소결 방식이 필요하게 되었다. 따라서 전술한 방법들은 이러한 면에서 부가 가치가 높다는 점에서 이의 개발이 시급하다 하겠다.

종래부터 진행되어 온 마이크로파 이동 통신기기의 소형화는 10년당 1/30 수준으로 이루어지고 있는데, 특히 유전체 필터의 경우 종래의 동축형 공진기로 구성되는 유전체 필터를 판형 공진기 필터로 대체하려는 연구가 진행중이다. 즉, 이는 판형 공진기들을 적절한 간격으로 배치하여 각 공진기의 한 단면에서 누설되는 전자계를 결합시켜 사용하는 기술로서, 종래 동축형 공진기의 경우에는 내부에 도체를 도포하여 사용하므로 그에 따른 도체 손실로 인해 Q가 낮았으나, 판형 공진기 필터의 경우 내부 도체가 불필요하므로 Q가 향상되고 구조가 간단하여 소형화, 고성능화가 가능해진다. 또한, 기기의 소형화를 위해 기기의 표면 실장화(SMD), 적층화 등이 요구됨에 따라 전극과 동시에 소결할 수 있을 정도의 저온 소결이 가능한 마이크로파 유전체가 개발되고 있다. 최근 유전체 필터 제작시  $960^\circ\text{C}$  정도의 저온 소결 세라믹스 조성으로 개발된  $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-CaO-Nb}_2\text{O}_5$ 계 세라믹 기판

을 적층하고 표면 실장화를 이룬 결과 기존의 것보다 부피가 1/20정도로 소형화되었다. 특히 무엇보다도 폭주하고 있는 통신 정보량의 증대로 인하여 통화 대기 시간이 증가하게 됨에 따라 이를 감당하기 위한 통신 시스템의 디지털화를 위해서는 정보 수용량을 증가시키기 위한 유전체 부품의 고주파수화, 저전력화, 저전압화가 요구된다. 그런데 이같이 소비되는 전압과 전력이 줄어들면 유전체 공진기의 발전 정도와 S/N 비등이 감소하여 전체적인 기기의 성능이 떨어지게 되므로, 이를 막기 위하여 보다 높은 유전율과 고주파수대에서 높은 Q를 가지는 유전체의 개발과 기기의 효율적인 설계기술 등의 개발이 기대되고 있다.

유전체 세라믹필터의 일반적인 연구개발 동향은 정보통신시스템의 소형화 추세에 따라 소형화가 요구되고 있으며, 적용시스템의 고속고주파화 및 고기능화에 따라 고주파부품에 요구되는 특성도 고성능화가 요구되고 있다. 또한, 부품의 저가격화는 시스템의 저가격화를 좌우하므로 저가격화가 추구하고 있다. 한편, 세라믹 유전체필터의 원천기술로는 정보통신시스템의 요구에 따른 소형화, 저가격화, 고기능화를 구현하기 위한 세라믹 유전체 소재 및 특성평가 기술과 필터 설계기술 등이다. 마이크로파 유전체 세라믹재료로 요구되는 주요 특성은 다음과 같다.

- 사용주파수에 따라 품질계수가 저하되지 않는 범위 내에서 유전율이 클 것(일반적으로  $1/\sqrt{\epsilon}$ 에 비례하여 공진기의 크기를 소형화할 수 있기 때문에 유전율이 큰 유전체는 소형화할 수 있는 반면, 품질계수는 저하되므로 일반적으로 20-100정도의 것을 사용한다.)
- 공진기의 품질계수는 주파수에 반비례하여 감소되고 품질계수에 영향을 주기 때문에 품질계수가 높을 것
- 공진주파수의 온도계수가 0ppm/°C 부근의 값을 가질 것 등이다.

마이크로파대에서 사용되는 유전체 세라믹의 제조공정은 일반 세라믹 제조공정과 마찬가지로 원료의 평량, 혼합, 성형, 소성 등의 공정을 거쳐 제조되며, 높은 품질계수를 유지하기 위해서는 산소

공공 등의 격자 결함의 생성을 방지해야 하며, 고순도 재료와 정밀프로세서 제어기술이 필요하다. 또한 세라믹 공진기의 공진주파수는 세라믹의 기하학적 크기에 의존하기 때문에 정밀한 세라믹 연마가공 공정이 가해진다. 국내의 연구개발 동향은 학계, 출연연구기관 및 산업체에서 활발히 연구가 진행되고 있어 가시적인 성과가 보이고 있다. 그러나 아직 고주파대에서의 소재에 대한 특성평가(고주파에서의 유전율 및 품질평가계수 평가)를 위한 측정기법에 대한 연구가 미흡한 실정이다. 또한, 각 기관별로 연구가 수행되기 때문에 산학연관의 협조체제를 구축하여 중장기적으로 체계적인 연구개발이 필요한 시점이다. 유전체필터 설계기술에 대한 기술동향은 필터의 소형화, 고성능화, 저가격화를 이룩하기 위하여 최적의 유전체 공진기 형상을 고안하고 형상에 따른 최적의 설계방법을 연구하고 있다. 유전체 공진기를 이용한 필터의 대표적인 형상은 일체형(Mono-Block type), 동축형(Coaxial type), BDLS형(Balanced Double Layer Stripin type), MLCC형(Multi-Layer Constant type) 등이 있으며, 동축형은 UIR(Uniform Impedance Resonator), SIR(Stepped Impedance Resonator)을 이용한 필터 또는 UIR과 SIR을 복합하여 이용하여 설계된 필터들이 있다. 보통 1/4파장 UIR은 저지대역에서 고조파 억제 성능이 좋지않아 능동소자의 출력단자에 사용하기에 적합하지 않다. 그러나 서로 다른 특성 임피던스를 갖는 두개의 전송선로로 구성되는 SIR은 UIR보다 더욱 소형경량화 될 수 있고 저지대역폭이 넓어 고조파 억제기능이 우수하다는 장점을 가지고 있다. 따라서 SIR과 UIR을 동시에 사용할 경우 보다 향상된 고조파 억제 기능을 얻을 수 있다. 따라서 일본등 선진각국에서는 Q가 높은 유전체를 채운 SIR의 특성이 분석되고 개발이 계속 진행중인 상태이다.최근에는 기존 원통동축형(Cylindrical coaxial type)SIR보다 더욱 소형화시킬 수 있는 구형동축(Rectangular coaxial) SIR이 개발되어 송수신 분리필터로 사용되고 있다. 또한 일체형에서도 공진기의 특성이 SIR특성을 갖는 형상도 개발중에 있으며, 공진기사이의 결

합량을 효과적으로 제어하기 위한 형상 및 제조와 특성이 우수한 형상, 소형화를 위한 형상 개발을 지속적으로 하고 있다. 필터설계 연구에서는 주로 체비셰프필터형태(Chebyshev filter type)로 설계하였으나 위성통신용 필터에 적용한 타원 필터형태(Elliptic filter type)도 시도되고 있다. 따라서 이동통신용 필터에도 타원필터가 도입 될 경우 더욱 소형, 경량화가 가능할 수 있을 것이다.

유전체 세라믹필터 설계분야에서의 앞으로의 연구개발은 입출력을 위한 Hole 또는 L.C 개별 소자를 사용하는 기존의 공진회로 구조에서 입출력단자를 직접 인출하는 구조로 소형화, 저가격화 및 삽입손실 향상을 기하고, 인덕터를 이용한 유극화 방법에서 공진회로상에서 인덕터를 구현하는 구조로 하여 삽입손실 및 감쇠특성을 향상시키도록 연구하고 있다. 설계기술에 대한 국내의 연구개발 동향은 소재기술개발에 비해 상당히 낙후되어 있다. 학계, 출연연구기관에서 부분적으로 연구가 이루어지고 있으며, 산업체에서는 거의 연구개발이 이루어지고 있지 못한 실정이다. 이 분야도 또한 각 기관별로 연구가 수행되기 때문에 산학연관의 협조체제를 구축하여 중장기적으로 체계적인 연구개발이 필요한 시점이다.

유전체 세라믹필터의 향후 기술전망으로는 세트에 대응하기 위하여 더욱 소형 경량화가 진행될 것이며, 내부사용 인덕터, 캐패시터 등의 부속소자 재료도 더욱 소형화하고, 사용 부품수를 절감하는 방향으로 개발 될 것이다. 국내의 국산화 추진과정 중에서 마이크로파용 유전체 소재분야에서는 유전율이 크면서 품질계수도 큰 소재의 개발이 이루어져 소형화 및 필터 품질계수 향상을 이룩하여야 할 것이며, 유전체 조성 중 고가의 희토류 원소 사용을 지양하여 저가격화를 꾀하기 위한 연구를 수행하여야 할 것이다. 또한, 소재의 개발과 병행하여 소재를 고주파 특성을 평가하기 위한 연구개발이 집중적으로 이루어져야 할 것이다. 설계분야에서는 기존의 공진회로 구조에서 입출력단자를 직접 인출하는 구조로 소형화, 저가격화하기 위한 연구가 수행되어야 할 것이다. 연구개발 추진체계에 있어서도 산학연관의 긴밀한 협조체제를 구축하여

기관별 역할을 분담하고, 중장기적으로 체계적인 연구개발이 필요한 시점이다.

### III. 압전재료의 개발 동향

기계적 에너지를 전기적 에너지로, 혹은 전기적 에너지를 기계적 에너지로 바꿔주는 이른바 “압전 효과”를 이용한 압전재료는 많은 기능성 전자재료 중에서도 특히 응용성이 뛰어나 차세대 핵심 전자재료로 떠오르고 있다.

압전재료는 현재 산업용 전자기기, 민생용 전자기기, 자동화기기 등의 핵심부품및 소재로 폭넓게 활용되고 있으며 최근에는 특히 이동통신기기의 급부상과 함께 전자부품의 소형·경량·고밀도화에 필수적인 기능성 전자재료로 매년 20%대의 성장을 거듭하고 있다.

현재 압전재료로 응용되는 재료는 <표 2>과 같이 단결정·다결정 세라믹스, 고분자재료, 박막재료, 다결정재료와 고분자재료를 복합화한 복합재료로 나눌 수 있다. 단결정재료로 널리 사용되는 수정은 공진 주파수의 대역폭이 좁고 온도계수가 매우 작으므로 신호주파수를 발생하는 오실레이터(Oscillator) 소자로 사용되고 있으며, 가격이 비싸고 전기기계 결합계수가 작은 단점이 있어 응용분야가 제한된다.  $\text{LiNbO}_3$ 와  $\text{LiTaO}_3$ , 단결정과  $\text{ZnO}$  박막재료 등은 탄성표면파(SAW : Surface Acoustic Wave)필터로 응용되고 있다. 다결정재료인 PZT계 세라믹스는 가공성이나 제반 압전 특성이 우수하고 가격이 저렴하여 초음파 진동자·필터 레조네이터·착화소자·센서 등에 가장 널리 응용되고 있다. 또한 고분자재료와 복합재료는 재료의 특성상 시트형태로 가공이 쉽기 때문에 각종 키보드나 수중 음향부품 등에 주로 응용되고 있다. 이러한 압전재료의 응용분야 및 제품응용에 따른 압전 원리를 <표 3>에 나타내었다.

압전재료의 응용은 압력을 가할 때 전압이 발생하는 효과의 이용으로부터 시작되었다. 저전압의 발생용으로는 레코드의 진동 픽업이 있으며, 고전

〈표 2〉 압전재료의 분류

구 분	압전재료
단결정	$\alpha$ -AlPO <sub>4</sub> (Berlinit), $\alpha$ -SiO <sub>2</sub> (Quartz), LiTaO <sub>3</sub> , LiNbO <sub>3</sub> , SrxBayNb <sub>2</sub> O <sub>8</sub> , Pb <sub>5</sub> -Ge <sub>3</sub> O <sub>11</sub> , Tb <sub>2</sub> (MoO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> , Li <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> , CdS, ZnO, Bi <sub>12</sub> SiO <sub>20</sub> , Bi <sub>12</sub> GeO <sub>20</sub>
박 막	ZnO, CdS, AlN, 다결정조성의 박막
다결정	PZT 계, PT 계, PZT-Complex Perovskite 계, BaTiO <sub>3</sub>
고분자	PVDF, P(VDF-TrFe), P(VDFTeFE), TGS
복 합	PZT-PVDF, PZT-Silicon Rubber, PZT-Epoxy, PZT-발포 Polymer, PZT-발포 우레탄

〈표 3〉 압전재료의 응용분야 및 응용원리

제품	응용 압전 원리	응용분야
압전 필터	압전 진동의 주파수 선택성 이용	각종 가전제품, 휴대전화
레조네이터	압전재료의 공진현상을 이용(기준신호 발생원으로 응용됨)	(TV, VTR, 오디오, 전화기)의 회로부품
초음파 진동자	압전 세라믹이 전기적 신호를 진동으로 전환시킬 수 있는 점을 이용	초음파, 세척기, 어군탐지기, SONAR, 가습기 등
압전버저, SPEAKER MEMBRANE	압전 세라믹이 전기적 신호를 소리로 변화시킬 수 있는 점을 이용	TV, VTR, 음향기기, 전자레인지, 전화기 등
압전 착화소자	응력을 가하면 전계가 발생하는 성질 이용	라이터, 이그나이터, 가수기기, 이그나이션 펌프, 스파크 펌프
압력·가속도·초음파 센서	압력, 가속도와 같은 기계적인 양과 초음파를 입력신호로 하여 이를 전기적 신호로 변환하는 성질을 이용	설비진단용진동센서, 비파괴검사용 초음파 탐촉자, 의료용(혈압계, 초음파진단기), 세탁기(수위제어용)
액추에이터	전압을 인가함으로써 일어나는 기계적 변형을 이용	가전제품 (VTR, 카메라), 도난방지기, 로봇, 유량 센서, 초음파 모터

압 발생용으로는 약 2만 볼트로부터의 방전 에너지를 이용하여 가스 착화용이나 가속도계·혈압계·전기 피아노·전기 기타 등의 픽업용, 그리고 카메라 플래시라이트의 기폭 네온관용으로도 실용화되고 있다.

한편 압전 세라믹스를 일정 크기로 가공했을 때 고유 진동수와 같은 주파수의 전압을 가하면 대단히 큰 진동 진폭을 얻을 수 있다. 이는 공진현상을 이용한 것으로서 필터 및 공진기로서 응용되어 포켓 벨·라디오·TV 등의 통신기용으로 실용화되고 있고, 최근에는 자동차 무선·퍼스널 무선 등에도 수요가 확대되고 있다. 또 마이크로프로세스의 출

연 이후 기준신호 발생원으로도 사용되어 PC의 시장 확대와 더불어 수요가 확대되고 있다.

에너지용으로는 초음파 세정기를 시초로 하여 플라스틱 등의 가공기, IC의 리드본딩, 중유의 개질용 등으로 분야가 확대되어 가고 있다. 초음파의 통신 스위치 등도 각종 센서 경보기용으로서 실용화되고 있다.

전압을 가함으로써 변형·힘 진동을 발생시키는 압전 액추에이터가 최근 수년 사이에 급속도로 실용화가 진행되고 있다. 압전 세라믹스와 금속관을 맞붙인 바이몰프(Bimorph)구조의 것은 압전 버저·발음체·스피커 등에 폭발적으로 시장이 확대되



고 있으며, 새로운 응용분야로서는 맹인용 전자식 점자 해독기, 잉크젯 프린터, VTR의 헤드 위치 결정 기구 등에 실용화되어 가고 있다. 또한 압전 세라믹스를 복수매 적층한 것은 반도체의 로광 장치, 레이저 트리머의 X-Y 테이블 등의 미소 정밀 위치 제어 등에 실용화되고 있다.

마지막으로 센서의 응용 사례를 보면 외부의 충격진동 등을 전기적 신호로 변환하는 경우가 가장 많은데, 공장자동화에서 설비진단에 사용하는 가속도 센서가 일부 국산화되었다. 초전효과(Pyroelectric Effect)를 이용한 적외선 센서는 과거 소자를 상당부분 일본에서 수입하는 형태이었으나 일부업체의 노력으로 국산화되어 활용되고 있으며, 기타 중량 감지용으로 이용하는 사례도 생겨나고 있다. 이 분야는 시장 전체 금액면으로 보아서는 아직도 소규모이지만 비교적 부가가치도 높고 향후 가장 큰 시장 확대가 예상되는 분야이기도 하다.

압전 세라믹스는 그밖에도 많은 응용분야가 제시되고 있으나 여러 가지 기술적·경제적 장애 요인에 의하여 사업이 활성화되지 못한 분야에 속한다. 그 원인은 다품종 소량생산 형태의 산업구조로 대기업들로서는 개발의 난이도에 비하여 투자의 효과가 적은 면이 있으며, 중소기업들은 자금력·기술력의 부족으로 개발은 물론, 개발된 제품의 사업화에도 많은 어려움을 겪고 있다.

앞으로 전자세라믹스 응용부품은 기기의 소형화에 의한 SMD를 향상과 이동통신기기 및 기기의 멀티미디어화, 디지털화의 진전으로 칩 부품 및 이동통신기기용 고주파 부품이 중심이 되어 전체시장을 이끌어 나갈 것으로 전망된다.

전자세라믹스 부품은 성장세는 계속될 것으로 전망되나 선진 일본업체의 저가공세 및 시장점유율 유지전략으로 인해 치열한 경쟁이 예상되며 이에 대비한 기술개발 및 투자전략이 필요하다. 전자세라믹스산업은 빠른 기술혁신과 기술변화로 특징지을 수 있는 첨단 기술산업이다. 그리고 다양한 기능성 재료들이 이용되며 산업규모도 빠르게 커지고 발전방향도 완전히 정해진 것이 아니어서 몇 가지 부품은 시장에서 성숙된 단계에 접어들었지

만 대부분의 부품들은 아직 성장하는 단계에 있다. 국내 전자세라믹스산업은 90년대 초반까지만 해도 기술부족, 관련 수요산업의 취약 등 제반 여건의 미성숙으로 산업화가 부진했다. 그러나 최근 전자세라믹스가 전자, 정보통신산업 등 첨단산업의 국제경쟁력을 확보하는 핵심기술로 부상됨에 따라 국내 대기업 및 중소 전자부품 제조업체들이 전자세라믹스부문에 대한 투자를 강화하고 있다.

하지만 국내업체들은 대부분 원료배합이나 소결 등에 대한 노하우가 상대적으로 일천해 세라믹스 전자부품에 사용되는 대부분의 원료를 일본 등 선진국에서 수입해 사용하고 있는 실정이다. 산화티탄, 티탄산칼슘, 티탄산스트론튬, 티탄산마그네슘( $MgTiO_3$ ) 등 유전체세라믹스 재료와 산화니켈(NiO), 산화코발트( $Co_3O_4$ ), 산화제2철( $Fe_2O_3$ ), 산화제2구리( $CuO$ ) 등 반도체세라믹스 재료 등이 전량 수입되고 있다. 한편 PZT계 압전체세라믹의 개발로 각종 전기전자제품에 널리 응용되고있는 압전세라믹부품시장은 현재 일본이 세계시장의 90% 이상을 점유하고있는 것으로 전해졌다. 또한 국산화 개발을 하더라도 우선 국내 수요가 충분하지 않은데다 신뢰성 문제 등을 이유로 수요업체들이 채용을 기피하는 탓에 대부분의 업체들이 원료개발에는 큰 관심을 기울이지 않고 있는 형편이다. 사용빈도가 높은 티탄산바륨의 경우도 지난해 삼중정밀화학이 국산화했으나 아직까지 국내 수요처를 제대로 확보하지 못한 것으로 알려지고 있다. 업계 관계자들은 세라믹스는 원료기술의 중요성이 큰만큼 「국산화제품 외면→국산화 투자기피→수입 의존 심화」라는 악순환의 고리를 끊기 위한 정부나 수요업체의 배려가 아쉽다고 지적한다.

가습기, 수중음파용 등 다방면에 응용가능한 진동소자는 삼성전기, 경원페라이트 등 다수의 전자부품업체에 의해 개발돼 양산단계로 접어들고 있으며 압전체를 이용한 압전부저도 LG부품·삼성전기·대원페라이트 등이 양산중이다. 이밖에도 가스레인저 및 가스라이터용 압전착화소자와 압전센서, 의료용 탄침자 등의 개발이 산업체, 대학, 연구소 등을 중심으로 활발히 이루어져 일부 양산과 함께 본격적인 상용화시대를 맞고 있다.

조명기기 전문업체인 금호전기는 신규 사업의 하나로 LCD 관련 부품사업에 진출했다. 현재 시험생산하고 있는 냉음극 형광램프는 저전류로 작동, 발열량이 적고 수명이 길며 빈번한 점멸에도 견디기 때문에 액정 디스플레이의 백라이트와 복사기 및 각종 표시용등의 광원으로 뛰어난 성능을 발휘한다. 금호전기는 또 현재 램프의 밝기를 조절할 수 있는 조광형 인버터 회로의 설계를 완료하고 제품의 신뢰성을 시험중이며 코일형트랜스 대신 압전 트랜스를 사용해 고효율화 및 박형화할 수 있는 인버터도 개발중이다.

세라믹 전문업체인 래트론이 칩타입 부온도계수(NTC) 서미스터를 생산, 시판하기에 이르고 있다. 올해 초 쌍용양회 중앙연구소 세라믹 연구원 출신 인원들을 중심으로 설립된 이 회사는 그동안 칩타입 NTC 서미스터를 시험 생산, 최근 자체 품질평가를 마쳤다. 서미스터 원료 배합, 가공기술을 확보한 이 회사는 온도센서 업체들에 대한 칩타입 NTC 서미스터 공급승인을 추진하는 것과 함께 표면실장부품(SMD)형 서미스터, 압전 진동자 등으로 생산품목을 확대해 세라믹전문 벤처기업으로 성장한다는 방침이다. 압전차화소자를 생산하던 런나이코리아의 세라믹팀도 최근 (주)발해를 설립하여 독자적인 기술개발과 경영방식으로 새로운 출발을 한 바 있다. 재원신소재 산업에서는 응용제품보다는 다양한 물성의 압전세라믹 소자만을 생산하여 압전 응용 부품 생산 회사에 공급하는 전략을 추진하고 있다. 이는 응용 부품의 know-how 공개를 꺼리는 조립회사에게 좋은 반응을 얻고 있다.

소형스피커 및 리시버유닛 전문업체인 거산음향은 자동차 도난경보용으로 사용되는 소형 압전사이렌을 개발했다. 이 회사는 그동안 해외에서 수입된 마그네틱형 사이렌을 대체해 상당한 수입대체효과를 거둘 것으로 기대하고 있으며 월 2만개 정도의 제품을 생산할 수 있는 양산시설을 갖추고 국내 완성차업체들과 공급 협상을 진행중이며 해외 시장 개척에도 나설 방침이다.

메타텍은 형상기억합금 제조기술 및 가공기술을 국산화, 상용화에 성공한 이후 이를 응용한 냉장고

냉매 댐퍼용 액추에이터, 커피메이커용 서멀액추에이터, 의료용 초탄성 세션 등을 개발했고 지난 95년 부설연구소 설립 이후 압전 액추에이터 및 초전형 세라믹소자를 이용한 초전형 적외선 센서 사업에 본격 참여한 국내 유일의 적외선센서 전문업체이다. 95년에 설립된 부설 기능재료연구소를 중심으로 적외선센서를 연구개발하고 있는 메타텍은 센서부문에 석, 박사급 6명 이외에 총 10여명의 연구인력을 통해 현재 노킹센서를 개발, 시험중에 있으며 특히 비접촉식 온도센서(IR센서) 연구 개발에 주력하고 있다.

삼성전기는 세라믹필터 등 3개 압전 세라믹필터를 개발, 총 50억원을 들여 설비를 갖추고 1997년 상반기부터 본격 양산을 시작했다. 이 회사가 이달부터 양산하는 부품은 세라믹필터, 세라믹발진기(레조네이터), 세라믹검진기(디스크리미네이터) 등 3종으로 모두 압전세라믹의 공진특성을 이용해 핸드폰, 무선호출기 등 이동통신 기기가 필요로 하는 특정주파수만을 통과시키거나 안정된 고주파수를 발진,검출하는 기능을 하는 압전세라믹 부품이다. 삼성은 이들 부품의 원료인 압전세라믹 파우더의 배합 조성기술도 자체 개발, 원료를 국산화함으로써 가격경쟁력을 한층 높일 수 있게 됐다. 삼성전기는 전압제어발진기(VCO), 온도보상수정발진기(TCXO), 전력증폭기(PAM), 듀플렉서, 소필터 등에 이어 이번 압전세라믹 부품까지 생산하게 됨에 따라 이동통신용 부품 전문업체로서의 위상을 확고히 하게 됐다.

#### IV. 결 론

국내 부품·재료산업을 육성하기 위해서 하나는 취약한 재료산업을 둘러싸고 있는 대내외적인 환경을 개선하는 일이 무엇보다도 중요함은 인지의 사실이다.

정부육성시책이 논의될 때마다 항상 지적되는 자금 및 세계혜택은 재료산업이 취약할수록 필요성은 더 절실해진다. 특히 한국경제가 무한경쟁 및

정부의 직접적인 산업지원제약을 핵으로 하는 WTO체제에 본격편입됨에 따라 상품화 이전의 기초기술 및 응용기술개발에 대한 지원비중은 훨씬 커지고 있는데 재료산업은 대표적인 해당부문이라고 할 수 있다. 한 대기업 전자부품회사의 퇴출기업 지정은 IMF의 시대적 상황에 민첩하게 대응하는 이 분야의 정책지원의 필요성을 역설적으로 제시하고 있다고 할 수 있다.

현재 정부가 지원하는 기술개발자금부담률은 20%수준이다. 이것을 일단 선진국수준인 30%선으로 끌어올리는 것이 시급한 것으로 지적되고 있다. 물론 부담률이 높아질수록 영세재료 업계에는 유리해지지만 이 정도수준에만 도달 하더라도 큰 도움이 될 수 있을 것으로 전문가들은 분석하고 있다. 또 총액의 10% 및 과거 2년 평균증가분의 20%로 묶여 있는 현행기술 및 인력개발 관련세계혜택은 정부의 의지만 있다면 더욱 확대할 수 있다는 것이다.

대기업에서 개발해야 하는 품목과 소기업에서 개발해야 성공하는 품목이 나뉘어져 있는 외국과 달리 한국에서는 대기업이 모든 부품을 다루고 있는 실정이다. 이는 관련 우수 연구 인력이 대기업에 집중된 것이 주요 원인이라고 볼 수 있는데 한국 경제가 중소기업 위주로 재편되면 상황이 바뀔 것으로 예상된다. 대기업의 신규 투자를 기다리며 새로운 유전 및 압전 세라믹 응용 부품을 개발하고 있는 젊은 연구원들은 안일하게 경영자의 결심을 기다리기보다는 21세기 새로운 사회를 이끈다는 마음으로 벤처창업에도 관심을 기울여야 할 시기이며 이를 통한 기술개발 및 유전 및 압전재료를 포함한 모든 재료, 부품 산업의 재도약이 멀지 않은 미래에 우리에게 다가올 것이다.

## 저 자 소개



金 昊 起

1945年 10月 11日生, 1964年~1968年 한양대학교 요업공학 학사, 1972年~1974年 Erlangen대(독일) 재료공학 석사, 1975年~1979年 Erlangen대(독일) 재료공학 박사. 1976年~1978年 Erlange-

n Univ. Materials Sci.&Engr. / Teaching assistant, 1979年~1980年 Erlangen Univ. Materials Sci.&Engr. / Associate Professor, 1981年~1983年 Firmengruppe Roederstein / Chief, 1983年~1989年 KAIST. Materials Sci. & Engr. / Associate Pffessor, 1989年~현재 KAIST. Materials Sci. & Engr. / Prffessor, 1996年~현재 KAIST. Electronic Component Materials Design Education Center / Chief, 1997年~현재 KAIST. High-Tech Venter Center / Director (주관심 분야: Electroceramics)