

# 최근의 압전세라믹스 개발 동향

글 \_ 조정호 || 요업(세라믹)기술원 첨단소재부품팀  
goedc@kicet.re.kr

## 1. 서론

대칭중심을 갖지 않는 결정에 응력을 가하면 응력에 비례하는 유전분극이 발생하고, 그 양단에 +, -의 전하가 나타나는데 이러한 현상을 압전정효과(direct piezoelectric effect)라고 한다. 반대로 결정에 전기장을 가하여 변위가 발생되는데 이런 현상을 압전역효과라고 한다. 이러한 정·역효과를 총칭하여 압전효과라고 한다.

모든 결정은 Fig. 1과 같이 32개의 결정 그룹으로 분류되며, 이중 21개의 그룹은 대칭중심(center of symmetry)을 갖지 못하였으며 이들 중에서 20개의 결정그룹이 압전 재료이다. 일반적인 고체(nonpiezoelectric solid)는 기계적 응력을 받으면 그와 비례하여 변형이 생기지만 압전 재료의 경우는 변형과 더불어 전하가 발생한다. (압전정

효과, piezoelectric direct effect) 또한, 압전재료에 전기장이 인가되면 기계적변형이 발생한다.(piezoelectric converse effect) Cady의 정의에 의하면 압전성이란 기계적 변형에 의하여 야기되는 전기분극(electric polarization)이며, 이때 전기분극의 크기는 변형에 비례하며 변형의 방향에 따라 그 부호가 변화된다.

이러한 압전세라믹스의 응용은 크게 3종류로 분류된다. 첫째는 기계적에너지가 전기적인 에너지로 전환(정방향 압전현상)되는 현상을 응용하는 것으로, 외부에서 소자의 전극면에 작용하는 힘, 충격, 진동 등을 미소한 전기적 신호로 변환시켜주는 센서류와 외부의 충격에 의한 고전압 발생장치 등이 있다. 우선 센서류에는 음파 및 초음파, 진동, 접촉, 힘 압력, 자동차의 노킹, 가속도, 각속도, 풍속검지용 센서, 음향기기의 픽업, VTR 헤드, 피부접촉용 마이크로폰, 수중청음기, 맥박센서, 유아용 무호흡센서, 청진기, 혈압계등을 검지하는 센서가 있으며, 도플러 효과를 응용한 유속센서, 유속과 단면적으로부터 유량을 검지하는 유량센서도 있다. 또 고전압 발생장치는 라이터, 가스렌지용 점화기, 이온발생기 등에 응용되고 있고, 복사기나 치환퇴치기에도 응용 가능하다. 두 번째로는 전기기계적 에너지를 기계적 에너지로 전환(역방향 압전현상)하여 사용하는 것으로, 액츄에이터류에는 가정용 가습기의 진동자, 안경이나 의치, 또는 반도체 웨이퍼나 LCD판넬의 세척에 사용되는 초음파 세척기용 진동자, 치석제거기나 초음파메스, 또는 마사지용 진동자, 플라스틱 용착에 사용되는 초음파 용접기, 유리 또는 귀금속 가공용 공구의 진동자, 선형 및 회전형 초음파 모

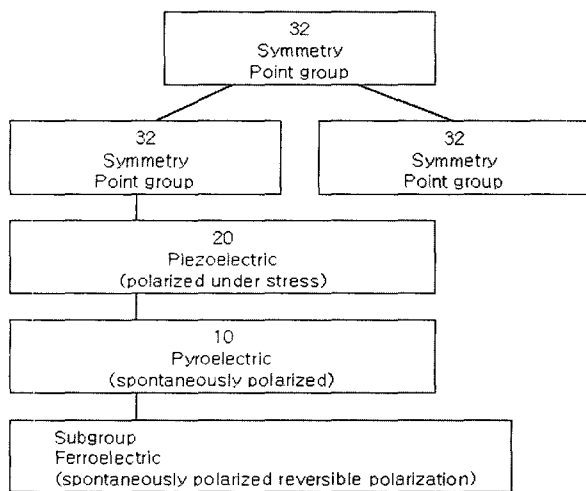


Fig. 1. 결정그룹의 분류.



터, bimorph, 압전팬, 압전부저, 압전스피커 등이 있다. 이외에도 압전세라믹 진동자에의해서 발생시킨 초음파를 화학공업분야에서는 응집, 집진, 유화, 분산, 야금과 도금, 맥주 등의 숙성 등에도 응용되고 있으며, 백내장치료, 담석 및 요로결석, 종양, 세균의 파괴등의 의료분야에도 이용되고 있다. 세번째로는 전기적 에너지를 기계적 에너지로, 이것을 다시 전기적 에너지로 변환하여 사용하는 것으로 자동차 후진시에 사용되는 back sensor, 거리, 수위, 수심, 금속두께의 측정장치, sonar, 비파괴검사용 초음파탐상기, 산부인과용 초음파진단기, 어군탐지기, 초음파현미경, SAW(surface acoustic wave) 필터, 지연선(delay line), 휴대용 컴퓨터의 LCD(liquid crystal display) backlight용 압전변압기 등에 사용되고 있다.

## 2. 최근 개발 동향

### 2.1 Pb base 소재 및 공정

1948년 BaTiO<sub>3</sub>가 최초로 개발된 이후 압전세라믹스의 소재에 있어서 많은 발전이 이루어 졌다. BaTiO<sub>3</sub>의 상전이 온도가 120°C로 낮아 상용화에 어려움이 있었으나, 1950년대에 PbTiO<sub>3</sub>-PbZrO<sub>3</sub>(PZT)계의 소재가 개발된 이후 압전세라믹스의 응용은 비약적으로 성장하였다. PZT는 BaTiO<sub>3</sub>에 비하여 상전이 온도가 높고, 전기에너지와 기계에너지의 변환효율이 높아 상용화에 매우 유리하였다. 특히 Zr과 Ti의 비율에 따라 결정구조가 변화하는데, 두가지 결정구조인 정방정체와 능면체가 공존하는 영역에서 매우 우수한 압전특성을 나타내는 특징이 있다. 이후 비교적 소결온도가 낮고 조성 제어가 쉬우며 압전 특성도 우수한 3성분계 페로브스카이트 소재가 개발되어 현재 상용화되는 대부분의 압전세라믹스의 소재로 사용되고 있다.

최근의 압전세라믹 소재의 개발은 전기기계변환효율(k)이 높고, 큰 변위량을 갖는 새로운 소재와 고신뢰성을 위한 high Qm 소재, 또한 lead free solder 사용에 의한 reflow 온도상승에 따른 high Tc 소재등이 중요시 되고 있다. 또한 적층 공정에서의 Cost 부담을 낮추기 위하여 저온 소결용 소재에 대한 개발도 지속적으로 진행되고

있다.

High k 및 high d<sub>33</sub>(대변위) 소재의 개발이 목적인 경우에는 Pb(Mg<sub>1/3</sub>Nb<sub>2/3</sub>)O<sub>3</sub>, Pb(Zn<sub>1/3</sub>Nb<sub>2/3</sub>)O<sub>3</sub>, Pb(Sc<sub>1/3</sub>Nb<sub>2/3</sub>)O<sub>3</sub> 등과 PbTiO<sub>3</sub>를 고용시킨 2성분계 소재가 가장 활발하게 연구되고 있다. 이러한 소재는 다결정체로 뿐만아니라 단결정 형태로도 많은 연구의 대상이 되고 있다. 일부에서는 Pb(Ni<sub>1/3</sub>Nb<sub>2/3</sub>)O<sub>3</sub>-PbTiO<sub>3</sub> 등의 이성분계에서 Pb(Ni<sub>1/3</sub>Nb<sub>2/3</sub>)O<sub>3</sub>의 함량을 크게하여 Electrostrictive 소재로 사용하려는 연구도 상당부분 진행되고 있다.

### 2.2 Pb-Free base 소재 및 공정

압전세라믹스 부품은 PZT(Pb[Zr,Ti]O<sub>3</sub>)를 기본조성으로 사용하고 있으므로 Pb가 약 65%(중량비)이상 함유되어 있다. 따라서 최근 환경규제 대상으로써 논의가 많이 이루어지고 있다. Pb사용의 규제현황을 살펴보면 가전제품과 관련하여서는 유럽위원회 환경 총국에 의한 WEEE 지령(Directive on Waste Electric Equipment, 폐 전기 전자기기 지령)에 근거하고 있다. WEEE지령이란, 간단하게 말하면 유해물질을 분별회수하고, 재활용(recycle)한다는 것이다. 그러나 RoHS지령 또는 ROS지령(Restriction on the use of certain Hazardous Substances, 어떤 종류의 유해물질의 사용에 관한 제한)에 근거하여 유해물질을 제품에 사용하나 대체 품위가 없는 등의 이유로 개별의 경우에 관하여 제외된 규정이 있다. 가전제품내의 압전세라믹스 부품의 경우 RoHS에 따라 대체소재가 없는 이유로 규제에서 제외되었으나, 무라타, TDK, NEC-Tokin등 압전세라믹스 제조사등의 대체소재에 대한 연구가 활발한 점을 고려할 때 무연계 소재의 상용화가 멀지 않았음을 예상할 수 있다. 또한 자동차 관련하여서는 폐차 리사이클 법규중 Lead(납)을 포함한 중금속의 사용을 법규 규정량 이상 함유를 금지하는 법안을 내놓아 실행중이다. 따라서 Pb-Free계 조성물에 대한 연구가 절실한 실정으로 최근의 Pb-free계 연구 동향을 살펴보면 다음과 같다.

#### 2.2.1 ANbO<sub>3</sub>계 세라믹스

A site 로는 K, Na, Li 및 이러한 조합(예를 들면

(K,Na,Li)NbO<sub>3</sub> 등)이 가능하다. 이러한 계의 조성은 지금까지 단결정의 응용을 목적으로 하고 연구되고 있고 KNbO<sub>3</sub> 등은 광전자공학(opto electronics)이나 표면 탄성 파동에 단결정이 판매되고 있다. 덧붙여서, LiNbO<sub>3</sub>는 Li 이온의 size가 너무 작기 때문에 페로브스카이트(perovskite)구조는 취하지 않고, 일메나이트(illmenite)구조를 취한다. 단, 통상의 세라믹 합성 프로세스로는 치밀한 소결체를 얻을 수 없기 때문에 hot press와 같은 공정을 통하여 치밀한 소결체를 얻는다. 소결 온도가 높고 적층체로는 전극의 비용이 높아질 수 있다. 상온에서 능면체 → 단사정 → 정방정 → 입방정과 같이 상전이 한다.

### 2.2.2 BaTiO<sub>3</sub>계 세라믹스

소결 온도가 높으며 PZT와 비교하여 curie온도가 낮다. (BT계는 대부분 100°C~200°C 정도의 curie온도를 갖는 경우가 많다) 제품으로의 사용온도를 살펴보면 -40°C~150°C 정도이다. 능면체 → 단사정 → 정방정 → 입방정과 같이 상전이 한다. Ba계만으로는 MPB는 구성하지 않는다고 말한 기술도 있다.

### 2.2.3 Bi계 층상구조 화합물

이 화합물은 결정 중에 페로브스카이트(perovskite) 구조를 포함하기 때문에 많은 조성에서 강유전성을 나타내는(=압전성을 나타내는) 것이 확인되고 있다. 단결정으로는 유전율과 분극 특성이 a(또는 b)축 방향에 크게 나타나고 c축 방향으로 특히 작으며 무배향의 소결체는 분극 특성은 특히 작다. 층의 매수(m)가 홀수(m=3,5)일 때 a축과 b축 방향의 변위에 의하여(c 축방향이 아님) 강유전성을 나타내고, m=3보다도 m=5의 화합물 쪽이 c축의 분극 특성이 약간 더 크게 나타난다. 단, 그렇다고 해도 a(b)축방향의 잔류 분극과 비교한다면 15분의 1 정도이다. 그 밖에 기계적 강도에 뒤떨어진다고 말한 기술도 있다. 구조가 복잡하고 통상의 세라믹 합성법으로는 순수한 화합물을 얻을 수 없다고 하며 X선 회절 패턴이나 화합물에 관한 정보가 적다. 단결정 육성이 어려운 것이 많으며 PZT보다도 압전성(d<sub>33</sub>)이 작아 액추에이터(actuator)에는 부적합 하다는 기술도 있다.

이 계의 압전 세라믹스는 일반적으로 curie온도가 높고 온도 특성이 좋다. 비유전율이 비교적 낮으며 aging특성이 좋다고도 보고되고 있다. 항 전계가 높고 BIT 등의 벌크로 히스테리시스 루프(hysteresis loop)를 그리게 한다. 또한 Bi Layer structure는 격자 이방성이 크기 때문에 Hot-forging이나 templated grain growth (TGG)와 같은 후처리 공정이 필요하다는 문제점이 있다.

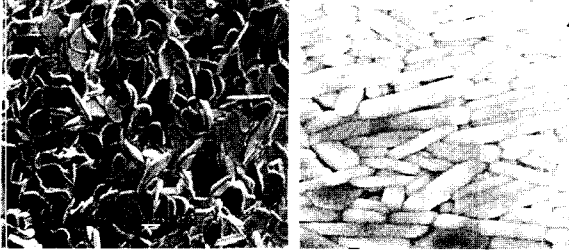
### 2.2.4 Bi계 세라믹스

화합물의 X선 회절 패턴(JCPDS 카드)이 거의 없기 때문에 단일상을 얻을 수 있는지는 판단하기 어렵다. 항 전계가 큰 화합물이 많고 공정적인 조건으로는 분극하기 어려울 것으로 생각된다. Bismuth계 화합물로 가장 연구가 활발히 진행 중인 것은(Bi<sub>1/2</sub>Na<sub>1/2</sub>)TiO<sub>3</sub> [BNT]세라믹스로서 coercive field가 7.3kV/mm이며 능면격자 비틀림(lattice distortion)은 0.4° (α=89°36'±3')정도이고, 상온에서 Rhombohedral구조이며 온도에 따른 상전이가 일반적인 perovskite화합물과는 다른 복잡한 양태를 보인다고 보고되고 있다. 또한, Curie Temperature, Tc=320°C, 강유전상에서 반강유전상으로 바뀌는 온도는 200°C이며 격자비틀림(lattice distortion)이 관찰되면 강유전성이나 반강유전성을 가지는 다른 페로브스카이트 화합물과는 다른 거동을 나타낸다고 보고되고 있다.

더불어 일반적인 고상반응법을 이용한 압전소재 특성의 한계를 극복하기 위하여, 다양한 성장방법을 적용하여 단결정 제조를 시도하고 있으며, 층상구조화합물이나 이방성이 큰 소재의 경우 Hot Forging 법, TGG 등 공정을 제어하여 압전특성의 개선을 추구하는 연구도 진행되고 있다. Fig. 2.에서 일반적인 고상합성법과 TGG법에 의한 미세구조 차이를 보여준다.

## 2.3 압전세라믹스 응용 부품

압전 세라믹스의 응용분야는 상당히 광범위하여, 특히 최근의 IT, NT, BT 분야의 성장과 함께 새로운 응용에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이중 최근에 관심을 받고 있는 대표적인 응용에 대한 기술동향에 대하여 살펴보고자 한다.



Randomly grain-oriented      Textured(Grain-oriented)

Fig. 2. 일반적인 고상합성법과 TGG법에 의한 미세구조

### 2.3.1 초음파 모터

초음파 모터는 초음파 진동체와 이동체 사이의 마찰력을 회전력으로 변환시키는 것으로 전자기식 모터와 비교하여 발생력이 높고, 반응속도가 빠르며, 정밀제어가 가능하고 토크가 크다. 그리고 응답성이 빠르기 때문에 차세대 정보 저장 장치로 응용이 가능할 뿐만 아니라 로봇틱스 분야, 반도체 및 군사용 무기의 구동용 모터등 첨단 장비에 응용할 수 있다.

압전 초음파 모터에는 진동판형, 원판형, 선형, 평판형 등이 있으며, 원판형과 선형 모터에 대한 연구가 가장 활발한 편이다. 휴대폰이 고급화되고 다기능화 되면서 다양한 형태 내지는 방식의 휴대폰 소형 모터가 잇따라 개발되고 있다. 업계에 따르면 삼성전기를 비롯한 피에조테크놀로지·자화전자등 중소 모터 업체들이 진동의 세기 조절이 가능한 지능형 진동모터, 소형 렌즈를 밀고 당기는 줌 기능의 초음파 압전세라믹 선형모터, 진동모터·스피커·리시버가 하나의 모듈 형태로 된 복합모터, 손 떨림 현상을 보정해주는 VCM(Voice Coil Motor) 모터 등을 속속 개발하고 상용화에 박차를 가하고 있다. 그동안 광학 줌 기능과 AF기능은 디지털 카메라에서는 초음파 모터가 이미 일반화되어 있지만 휴대폰에는 모듈의 크기 문제로 적용되지 못했으나, 지속적인 소형화를 통해 향후 시장 활성화가 예상된다. 또한 Seiko watch의 경우 스텝모터를 대체해 초음파 모터를 사용한 시계를 개발하여 판매하고 있으며, NASA에서는 화성 탐사로봇의 관절로 사용하기 위하여 개발하는등 다양한 용도로 개발이 진행되고 있다. 더불어 모터 지지방법과 효율적인 출력 전달 방법 및 구동기구에 대해 많은 연구가 되어지고 있다.

Fig. 3에 초음파 모터의 응용분야를 나타내었다.

### 2.3.2 센서 및 액추에이터

압전 액추에이터는 전기 신호, 즉 전압의 인가에 따라 기계적인 변위가 발생하는 압전 세라믹스의 특성을 이용한 것으로 전력 소비가 낮으며, 정밀한 변위 제어가 가능하다. 사용되는 소자 형태는 주로 바이몰프(bimorph) 형태와 적층 형태로 구분되어 생산되고 있다. 바이몰프형은 대변위 응용에 적합하며, 적층형은 변위는 작지만 응답속도와 발생 응력이 큰 특징을 가지고 있다. 압전 액추에이터에는 다른 타입(유압식이나 전기식등)의 액추에이터와 비교할 수 없는 우수한 특성을 갖는데, 빠른 응답성, 정밀제어성, 고발생력 등을 들 수 있다.

메카트로닉스와 정보통신산업, 그리고 나노 테크놀로지, 바이오 세라믹의 발전에 따라 미소변위제어의 핵심 부품으로 기대되고 있으며, 광학기기, 정밀가공기기, 로봇, 분석기기 등에서 응용분야가 확대되고 있다. 또한 MEMS 기술의 발전과 더불어 초소형 액추에이터의 개발이 활발하며, 상당 부분 응용이 진행중이다.

최근의 기술 동향은 적층형 액추에이터와 MEMS를 이용한 소형, 고정밀도, 다기능을 갖는 액추에이터의 개발이 주류를 이루고 있다.

검사대상물의 크기가 점차 소형화됨에 따라 이를 검지하고 미세작업을 하기 위한 액추에이터 역시 소형화가 되어야만 한다. Bio Instrument Lab. 과 Oldenburg 대학

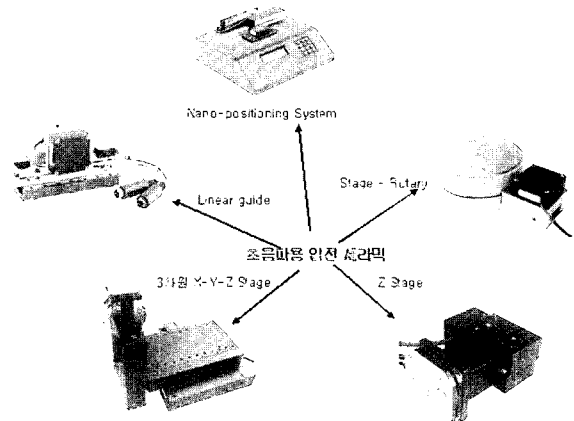


Fig. 3. 초음파 모터의 응용분야

(독일)등에서는 미세작업용 초소형 로봇의 개발이 이루어지고 있으며, 이러한 로봇 제작에 있어서 소형 압전액추에이터의 개발은 필수적이다. 일본의 대학 및 연구소에서 정밀작업용 마이크로 로봇의 개발이 활발하며, 전원 공급의 문제점 및 복잡한 작업을 위한 지능화를 위한 문제점이 개선되면 충분히 상용화될 것으로 예측된다.

Fig. 4.는 일반적인 적층형 액추에이터의 변위특성을 나타낸 그림이다. 이러한 액추에이터는 소형화 및 저 소비전력화를 위하여 green sheet의 두께를 줄이고, 내부전극간의 절연을 시키는 방법에 대한 연구가 이루어지고 있다.

또한 새로운 기능의 액추에이터를 제조하기 위하여 fiber형태의 압전세라믹 및 세라믹 Composite에 대한 연구도 해외 대학 및 연구소에서 진행되고 있으며, 향후 이 분야에 대한 연구도 활발해질 것으로 예상된다. Fig. 5에서 Ti-cored PZT clad complex wire의 표면 및 단면의 전자현미경 사진을 보여준다. 이러한 압전 fiber를 이용하여 다기능 smart actuator의 제조가 가능하다.

이 이외에 수술용 다자유도 촉촉자, 세포조작용 액추에이터, 약물투여용 마이크로 펌프 등 BT관련 응용에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다.

### 2.3.3 초음파 미세 가공

초음파 미세진동 가공기술이란 3축 NC제어 40kHz미세진동+회전가공의 결합의 복합가공방식으로서 지금까지 레이저 및 에칭가공 등의 한계점인 출구 홀 내부단면

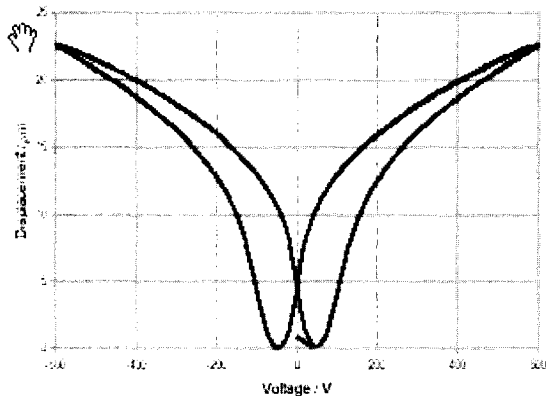


Fig. 4. 일반적인 적층형 액추에이터의 전압에 따른 변위 특성.

의 진원도 및 직진도를 개선시킨 신개념의 가공방식이다. 최근 이 기술은 활발히 연구중이며, 가공 적용 재질로는 실리콘, 단결정실리콘, 세라믹(알루미나, 질르코니아,etc), BK7, 유리(소더라임,파이렉스,퀴츠,etc), 사파이어, 다이아몬드, 페라이트 등 반도체 및 광통신관련부품적용이 가능하다. 기타 SUS, SK11, etc등도 가공가능하다.

초음파 미세진동 가공기술의 특징은 첫째로 초정밀 홀형상(0.05×1.5t) 및 기타 형상가공이 가능하고, 둘째로 가공표면의 데미지(Damage)극소화 및 가공에 의한 방향성이 없어 데미지층을 극소화시킬 수 있다. 셋째로 공구 날끝과 가공표면이 가공열에 의한 팽창 또는 충돌하지 않으므로 가공저항이 적다. 초음파가공과 타가공과의 비교를 위하여 Fig. 6에 나타내었다.

### 2.3.4 압전 트랜스포머

최근 전자기술의 진보에 의해 제품이 매우 소형화가

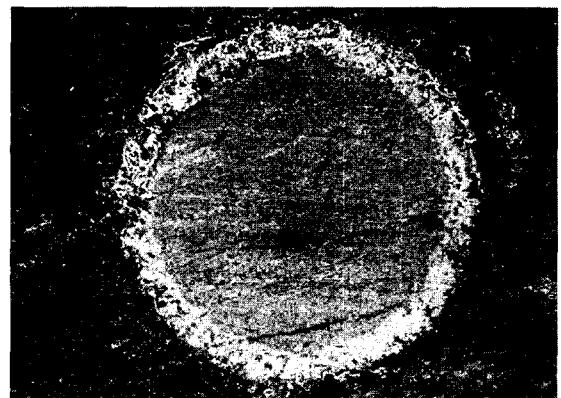
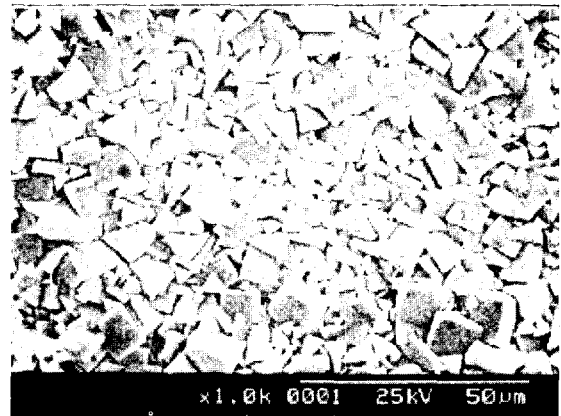


Fig. 5. Ti-cored PZT clad complex wire의 표면 및 단면.

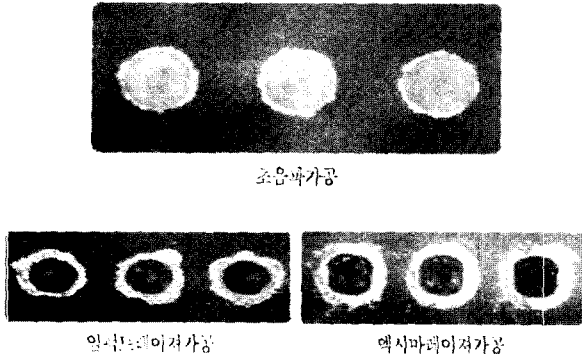


Fig. 6. 초음파가공과 타가공과의 비교

되면서 공급전원의 소형 박형화가 요구되고 있다. 이에 따라 소형 박형화가 가능하고 고주파수에서 높은 전력 전송이 가능한 압전 트랜스포머에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 또한 기존의 권선형 트랜스포머의 과열에 따른 문제점이 노출되면서 더욱 압전 트랜스포머에 대한 관심이 증가하고 있으며, 액정 백라이트용으로 활발하게 응용되고 있는 추세이다.

압전 세라믹 인버터에 사용되는 트랜스포머는 대부분 로젠(Rosen)형 구조로 전송 전력에 따라 큰 변위를 수반한다. 따라서 대진폭으로 구동하는 소자에 적용하는 소재로는 작동시 발열이나 압전 특성의 열화가 적은 재료가 바람직하다. Fig. 7에 일반적인 로젠(Rosen)형 압전 트랜스포머의 등가회로 및 그 구조를 나타내었다.

압전 트랜스포머의 경우 소재의 특성이 매우 중요하며, 특히 진동에 따른 발열을 최소화하기 위하여 가능한 Qm(품질계수)가 우수한 소재이며, 발열에 따른 파괴강도가 높은 소재의 개발이 중요하다. 더불어 권선형 트랜스포머와의 가격 경쟁력을 갖기 위해서는 내부전극으로 Ag함량이 높은 재료를 사용하여야 하며, 이를 위하여 세라믹 소재의 저온 소성이 필수적이다. 국내외에서 저온 소성 소재의 개발과 이를 이용한 적층형 압전 트랜스포머의 실용화가 상당부분 진행되었으나, 이에 대한 더 많은 연구가 필요할 것으로 생각된다.

### 3. 문헌 · 특허 동향

최근 수년사이의 압전세라믹스 관련 문헌의 국가별 발

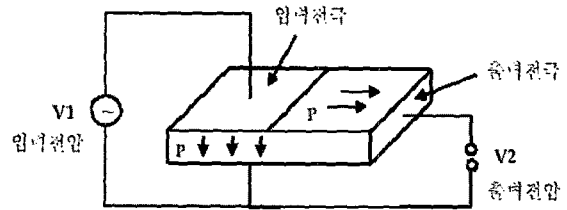
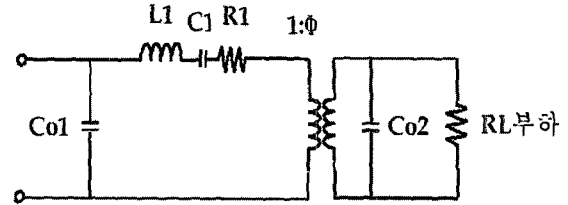


Fig. 7. Rosen type 압전 트랜스포머의 등가회로 및 그 구조

표 현황은 미국(23%), 일본(12%), 중국(12%), 영국(6%), 그리고 한국(4%)의 순으로 이루어졌다. 1990년대 이전은 주로 소재의 물리화학적 특성 개발의 개발이 이루어진 반면, 이후에는 새로운 소재 개발과 함께 그 응용 및 적용분야에 대한 기술개발, 특히 IT 기술의 발전에 따라 전자, 전기, 항공우주, 자동차, 통신부문의 기술개발에 초점이 맞추어져 있다.

관련 특허 역시 정보통신, 전자, 전기, 자동차, 항공우주 등 첨단 핵심기술 중심의 출원이 주를 이루고 있다. 특허 내용은 신소재 개발, 트랜스포머, 액추에이터, 트랜스듀서, 레조네이터, 센서등 광범위하고 다양한 출원이 이루어지고 있다. 내용을 보다 세부적으로 살펴보면 80% 이상이 압전성을 이용한 소자나 장치 개발이 대부분을 차지하고 있으며, 소재로는 PZT 등의 세라믹 소재를 이용한 개발이 중심을 이루고 있다. 응용분야로는 초음파 관련 분야, 센서, 액추에이터 등 전자부품에 활용되는 기술들이 대부분을 차지하고 있다. 특허의 경우 일본의 Murata Manufacturing이 가장 많은 특허출원을 하고 있으며, 전체의 90%에 가까운 양을 일본 기업에서 출원하고 있다.

### 4. 향후 기술 전망

향후 새로운 세라믹스 소재의 개발부문과 이를 활용한

센서, 액추에이터, 트랜스듀서, 트랜스포머 등의 소자, 장치 등의 개발이 더욱 가속화 될 것으로 예상된다. 국내의 경우 반도체, 가전 및 통신기기 분야에 응용되는 압전 세라믹스 기술특허가 다른 국가에 비하여 다수 출원되어 있으므로, 향후에도 이와 관련된 기술들의 확장이 예상된다. 일본과 유럽의 경우 측정과 감응장치등에 관련된 소자 개발의 증가가 예상되며, 미국은 환경과 에너지, 자원 등의 미래산업과 연관되는 기술개발이 주를 이룰 것으로 예측되고 있다.

## 참고문헌

1. T. Takenaka, A. Huzumi, T. Hata, and K. Sakata, *Silicates Industrials*, **7-8**,136-142 (1993).
2. T. Takenaka, T. Okuda, and K. Takegahara, *Ferroelectrics*, **196**, 175-178 (1997).
3. B. J. Chu, G. R. Li, X. P. Jiang, and D. R. Chen, *Journal of Inorganic Materials (in Chinese)*, **15**.
4. 김호기, 전자세라믹재료 반도체출판사 (1994).
5. 박창엽, 전기전자용 세라믹스 반도체출판사 (1997).
6. A. Herubut, and A. safari, *J. Am. Ceram. Soc.*, **80**,

2954-2958 (1997).

7. S. E. Park, S. J. Chung, I. E. Kim, and K. S. Hong, *J. Am. Ceram. Soc.*, **77**, 2641-2647 (1994).
8. E. Fukuchi, T. Kimura, T.Tani, T.Takeuch and Y. Saito, *J. Am. Ceram. Soc.*, **85**, 1461-1466 (2002).
9. B. J. Chu, D. R. Chen, G. R. Li and Q. R Yin, *J. Euro. Ceram. Soc.*, **22**, 2115-2121 (2002).

## ◎ 조 정 호



- \* 1989년 한양대학교 학사
- \* 1992년 KAIST 석사
- \* 1997년 KAIST 박사
- \* 2001년 삼성전기 선임연구원
- \* 현재 요업기술원 첨단소재부품팀 선임연구원