

극막 다층에 의한 고효율 저전력 액추에이터 세라믹스 소재 기술

글 _ 김병익
한국세라믹기술원

1 서론

액추에이터용 세라믹 소재는 다양한 국내 산업 중에서도 세계적으로 경쟁력이 있는 무선통신기기, IT, 반도체 장비, 자동차 및 로봇산업의 핵심 부품 소재로 응용되고 있다. 일반적으로 세라믹 소재의 가격 비중은 차세대 성장 동력 산업의 시스템 가격과 비교하여 볼 때 일부분에 불과하나, 이 세라믹 소재의 품질이 세트의 성능을 좌우하므로 시스템 제품의 신뢰성에 미치는 영향이 매우 큰 핵심 소재라 할 수 있다. 산업적 측면에서 액추에이터용 세라믹 소재는 자동차 등 수송산업과 휴대폰, 카메라 등 IT 산업, 에너지, 바이오 등 전방 산업의 생산을 유발시키는 산업간 연관효과가 월등한 소재산업으로서 수요산업에 대한 기여도도 상당하다. 그러나 국내의 소재개발 기술의 낙후와 기업의 영세, 고 신뢰성 보증이 요구되는 액추에이터 소재 분야의 고유한 산업적 특성, 고품질의 세라믹 분말 및 제품 제조 기술의 낙후, 소량 다품종에

따른 시장 규모의 확보 어려움, 향후 친환경에 따른 인체 무해한 소재의 원천 기술 개발등의 산업 경쟁력 측면에서 일본, 미국, 유럽 등 선진국과의 커다란 기술적 격차를 나타내고 있다.

국내 액추에이터 산업의 현 위상과 국내·외의 미래 산업적 요구는 고 신뢰성, 고품질 세라믹 분말 및 제품 제조 기술, 향후 환경 규제에 따른 인체에 무해한 소재의 원천 기술 확보로 요약된다. 이는 관련 부품 수요산업에 대하여 인체에 무해한 새로운 세라믹 소재들의 다기능 복합화, 고 신뢰성을 확보할 수 있는 공정을 제공함으로써 제품 다양화, 소형화, 고 신뢰성을 통한 수요 산업과의 연계를 구현할 수 있다. 미래 신성장 동력산업과 동반 성장하는 원천기술적 돌파구이다. 대부분의 액추에이터 소재 및 부품 요구 성능은 각 산업의 수요 특성에 의해 결정되며, Table 1과 같이 산업 특성 및 적용 분야에 따라 매우 다양하다. 이는 소재 및 공정 개발에 있어 복합, 다양한 기술이 요구되고 있다는 것을 의미한다. 그러나 각 분야별 공통적으로 요구되고 있는 사항은 환경규제에 대한 해결방안, 에너지 관련으로 저 소비전력에 대한 요구, 여러 기능을 복합적으로 해결하는 능력이 주요 현안이다. 따라서 환경규제에 대응하는 인체에 무해한 소재 개발, 저전압화 공정 기술, 복합 기능 설계기술이 우선적으로 해결되어 연관 전후방 산업과 균형적으로 발전해야 한다. 본 연구를 통하여 개발된 세라믹 액추에이터는 Fig. 1과 같은 다양한 분야에 응용이 가능하다.

Table 1. 세라믹 액추에이터 연관 산업의 발전 추세

연관산업	성장추세 (향후 10년)	발전 추세
가전, IT	연 평균 2.5%	- digital (카메라)기기용 저전력 복합 기능 (액추에이터/센서) 부품 수요
수송기기, 자동차	연 평균 5% 이상	- 에너지 절감 및 가스 배출량 감소용 인젝터용 부품 - 고압용 초음파 기기용 환경 친화형 소재 신수요
정밀 기계	연 평균 5% 이상	- IT 관련 초정밀 기기용 부품 - 로봇 산업 관련 액추에이터 신수요
Bio산업	미래성장동력 지속 발전	- 초소형 진단 부품 수요 - 초음파 기기류용 소재 부품 기술
로봇	미래성장동력 지속 발전	- 초소형 저전력 부품

2. 세라믹 액추에이터의 중요성

현대 산업의 특징 중 하나는 생산설비의 자동화, 제품의 고정밀화, 고효율화가 빠르게 진행 중이며, 이에 따른 메카트로닉스 기술이 급속히 발전하고 있다. 액추에이터는 메카트로닉스, 정보통신 및 바이오 분야 등의 발전에 맞게 정밀 제어의 핵심 부품으로 급성장하고 있다. 또한 나노기술의 급격한 발전과 더불어 전자 및 메카트로닉스 산업의 나노화가 진행되어 가고 있다. 예로써 반도체 집적회로 기술의 향상에 의하여 전기회로의 집적도가 해마다 높아짐으로써 더욱 미소화되고 있다. 이에 따라 로봇을 비롯한 메카트로닉스 분야에서는 시스템 전체의 소형화, micro화가 기술적으로 하나의 큰 흐름이 되었다. 일반적으로 위치 제어를 하는 기술은 motor와 볼나사를 사용하는 기술을 통하여 이루어져 왔으나, 위치결정 요구가 micron order에서 sub-micron order로 엄격해짐에 따라 motor와 볼나사는 구조상 한계에 이르게 되었다. 따라서 최근의 미소위치 제어를 위한 액추에이터에는 압전 소자

를 이용한 미소 구동장치가 크게 확대되고 있다. Fig. 2는 센서의 측정 정밀도와 가공 정밀도의 발전추이를 나타낸다. 측정 정밀도는 급속히 증가하여 단시간 내에 nano 스케일의 측정이 가능할 것으로 예측되며, 이에 따른 가공 공정도 발전 할 것으로 예측된다. 또한 IC 칩 제조 공정의 경우 이미 수십 nm의 선폭이 요구되고 있으므로, 이를 제어할 수 있는 액추에이터가 반드시 필요하다고 할 수 있다.

또한 환경 문제에 대한 대응의 중요성이 점점 증가하고 있다. 대표적으로 많이 사용되고 있는 액추에이터용 세라믹 소재는 기본조성이 PZT(Pb(ZrTi)O₃) 3성분계로 Pb가 약 65%(중량비) 이상 함유되어 있으며, 다른 부품·소재에 비해 기술적으로 난해하여 대체 조성 개발이 쉽지 않은 실정이다. 한편, 우주과이 라운드에 이은 그린라운드가 21세기의 새로운 무역장벽으로 부상함에 따라 이러한 미래 성장형 기술산업을 지탱할 중요한 핵심요소로서 친환경에 대한 선진 각국의 관심과 규제에 대한 노력은 갈수록 증가되고 있다. 특히, 중금속에 대한 피해사례

■ 응용 분야 : 메카트로닉스, 정보통신, 미래형자동차 등의 정밀구동 및 정밀제어 분야 등

 <p>Piezo Actuator Module</p> <p>Nozzle</p> <p>Common Rail Diesel Injector</p>	 <p>Nano scale positioner</p>	 <p>Zoom / Auto Focus</p>
<p>Semiconductors, Microelectronics Nanometrology Mask and wafer alignment Critical dimension measurement Microlithography Inspection systems Vibration cancellation</p> <p>Life Science, Medicine, Biology Scanning microscopy Patch clamp Gene manipulation Micromanipulation Cell penetration Microdispensing</p>	<p>Precision and Mechanical Engineering Vibration cancellation Fast tool servos Non-circular boring, drilling, turning Smart structures / structural deformation Wear correction Needle-valve actuation Micropumps Piezoelectric linear motor drives Knife edge control in extrusion tools Micro-engraving systems Shockwave generation</p>	<p>Data Storage R/W head testing Spin stands Vibration cancellation</p> <p>Optics, Photonics and Metrology Fiber optic alignment & switching Image stabilization Adaptive optics Scanning microscopy Nano auto-focus systems Interferometry Adaptive and active optics Laser tuning Scanning mirrors Vibration generation</p>

Fig. 1. 액추에이터의 활용 분야.

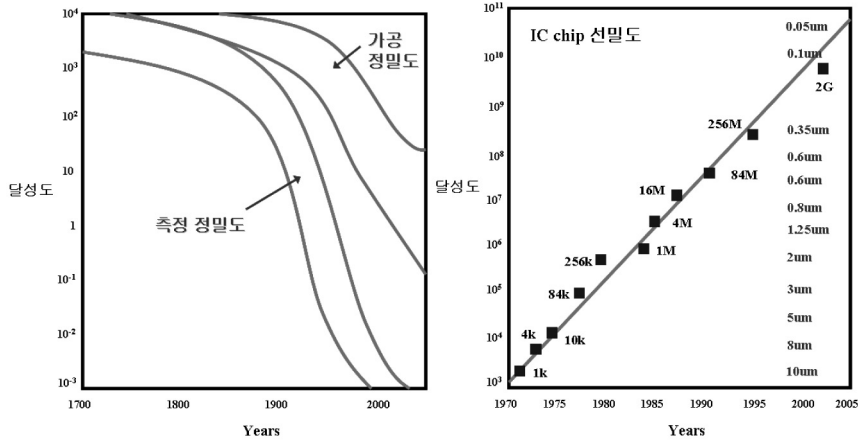


Fig. 2. 측정 및 가공 정밀도의 변화.

가 사회적인 문제로 제기되면서 세계의 관심 또한 증가하고 있으며, 중금속의 사용을 규제하려는 움직임이 활발하다. 환경오염 문제를 야기하는 중금속 중 납(lead)은 PZT(PbZrTiO₃)계 압전 세라믹스에 많이 사용되고 있다. 대체 조성개발은 세계적으로 유럽과 일본의 몇몇 회사를 중심으로 진행되고 있으며, 최근에는 중국과 국내에서도 활발히 연구 중이다. 따라서 경쟁력 있는 핵심 기술을 확보하기 위해 압전 세라믹스내의 환경유해물질을 대체할 재료에 대한 양적, 질적 연구개발이 절실히 필요한 실정이다. 유럽, 미국 등에서의 환경규제에 대응할 수 있는 소재를 개발하여, 관련 수입부품을 대체하고 수출기반을 구축하여야 할 것이다.

3. 기술 동향

최근에는 새로운 구동원리의 액추에이터에 대한 연구와 신소재를 이용한 다양한 액추에이터의 개발이 활발히 진행되고 있다. 이중 가장 관심을 받는 분야인 지능형 재료 시스템(Smart/Intelligent Material System)은 기본적으로 센서, 콘트롤러, 액추에이터가 일체화되어 제어기능을 갖고 상황 변화에 능동적으로 대응 가능한 시스템이다. 이러한 시스템 구성을 위하여 고성능이며, 복합기능을 갖고 능동적인 반응을 하는 액추에이터 및 센서 재료의 개발이 절대적으로 필요한 기반기술이라고 할 수 있다. 따라서 센서와 액추에이터의 두 가지 기능을 갖는 지능

형 소재가 개발의 주요 대상이 되고 있다. 센서 소재와 액추에이터 소재는 특성적으로 서로 상관관계를 가지고 있으며, 이러한 특성을 충분히 이용하여 통합 융합화 시킴으로써 소형이면서 다기능인 지능형 소재 시스템을 설계·구현시킬 수 있다. 최근 전기장, 응력 등 외부 에너지에 영향을 받아 전자 스핀 또는 원자의 전자운동 상태가 변화되어, 재료 내에 도메인이 발생하는 메카니즘에 의한 기능을 발현하는 재료 군을 통칭해 Ferroic 재료군이라 부르며, 이러한 소재에 대한 중요성이 부각되고 있다. 이들의 특성을 융·복합화한 multi-ferroic 소재 및 적층 복합화에 의하여 혁신적인 고효율 소재의 개발이 가능하고, 또한 소형 디바이스화가 가능할 것으로 예측되고 있다.

미래형 액추에이터로서 요구되는 특성은 큰 출력, 넓은 범위의 변위, 빠른 응답특성, 장기적인 신뢰성으로 상기의 특성을 만족시킬 수 있는 소재의 개발에 주력하고 있다. 압전 세라믹스 소재의 경우 소재의 임계성능 구현을 위하여 도메인 엔지니어링을 통한 특성의 극대화가 추구하고 있다. 특히, 나노 메조 질에 의한 조직제어를 통해 제조된 소재 및 나노 헤테로 적층 액추에이터 소재는 결정과 도메인 형태가 평형상의 특성과 매우 달라 소재 개발에 있어서 혁신적인 발전이 있을 것으로 기대되고 있다.

다강체 물질에 대한 전 세계적인 연구 열기는 매우 뜨겁다. 불과 5년 전 부터 이 물질계가 주목받기 시작하여

최근에 Science, Nature 등에서 2005년부터 본격적으로 이 물질계의 중요성을 부각시키면서 더욱, 이 신소재의 물성 연구 및 응용 연구를 시작하는 연구 그룹이 확대되고 있다. 미국 물리학회에서 Focus session이 2003년 2개에서 매년 늘어 2006년에는 5개 이상이 채택되었고 미국 재료학회, 미국 진공학회, 자기학회 등에서 최근 다강체 물리 및 응용을 Focus session으로 마련하고자 하고 있다. 이러한 전 세계적인 활발한 연구 동향으로부터 예측컨대, 최단시간에 산업화에 가까운 다강체 응용 기술은 인위적으로 제작한 복합 구조나 복합체에서 다강체의 액추에이터 및 센서기술이라고 볼 수 있다. 자왜-압전 복합체는 가장 우수한 magnetoelectric(ME)특성을 나타내므로 최근 관심이 높아지고 있으며, 나노기술과 결합된 nano magnetoelectricity 기술은 차세대 핵심소재기술로 떠오를 것으로 예상된다. 현재는 가장 우수한 자왜 및 압전효과를 나타내는 복합체에 대해 관심이 집중되고 있으며, Nan 등은 이들 복합체에서 거대 ME효과가 얻어질 것으로 예상하였다.

4. 개발 기술의 범위 및 요구 특성

개발하고자 하는 소재의 원천기술영역은 세라믹의 전자기 성능과 기계적 성능의 상호작용, 이러한 성능의 세라믹의 적절한 복합화에 의한 다기능화 [센싱(감지) 및 액추에이팅(작동)]을 실현할 수 있는 다기능 액추에이터용 세라믹 소재 개발 관련기술이며, 이를 통하여 차세대 지능형 액추에이터 부품 및 시스템 개발에서 Leader 위치를 선점하기 위함이다. 이를 위해서는 현재의 일반화된 유연 소재 공정을 기술적으로 돌파할 수 있는 새로운 친환경 세라믹소재의 임계성능 구현을 위한 결정구조/Domain 제어, 다기능 소재 개발을 위한 초미세 세라믹 분말합성 및 미세구조 제어, 이러한 소재 복합기능화 공정을 위한 내환경성 소재를 이용한 극막 적층 및 동시 소성 기술, 초소형화의 지능형 액추에이터 제작을 위한 마이크로 가공 기술 (MEMS/LIGA)을 개발하고, 이들을 접목하는 새로운 원천기술영역이 창출되어야 한다. 액추에이터용 다기능 세라믹은 다양한 성능을 구현하는 다강체 소재로서, 이와 같은 장점을 극대화 하여 기존의 단순 기능형 액추에이터 소재로부터 다기능형 (자기 감지, 자

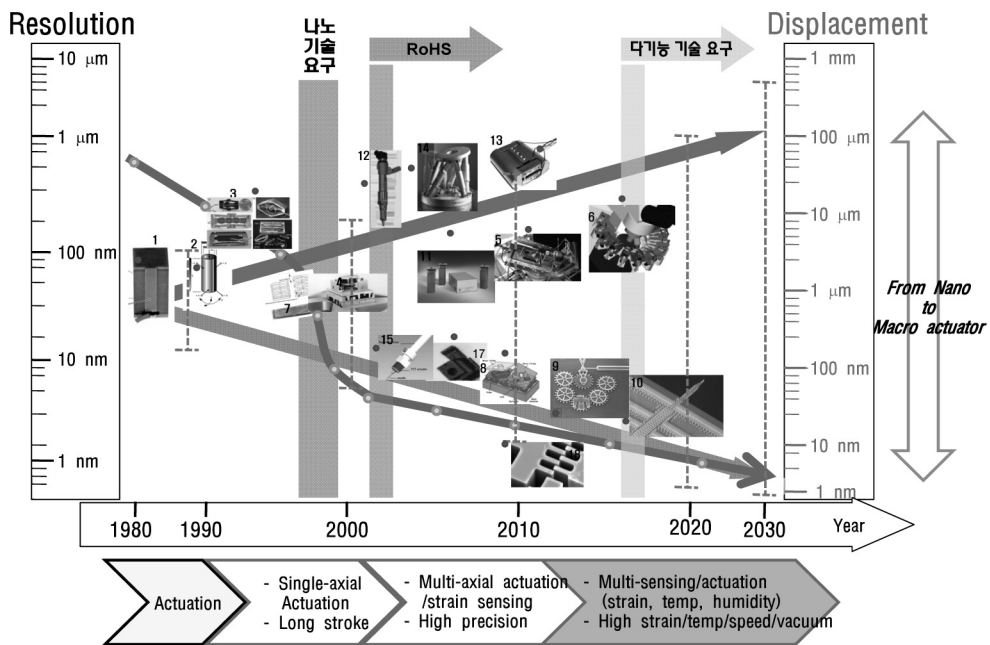


Fig. 3. 액추에이터 수요기술 예측.

가 제어 등) 소재로 진화함으로써, 미래 수요 산업의 다양성에 대응하는 지능형 시스템 사업 관련 기술 개념을 구현하는, 국가적으로 가장 중요한 새로운 개념의 원천 기술개발 영역으로 평가될 수 있다. 이를 위하여 요구되는 특성을 요약하면 다음과 같을 것이다. 1) nanometer scale의 이용, 2) 대 변위, 대 출력, 빠른 응답특성, 3) 다 기능화 및 지능화, 4) 유해물질 제거를 통한 친환경화, 4) 무연 세라믹 초미세 분말합성 및 미세구조 제어 기술, 5) 저전력화, 고신뢰성화, 저가격화, 및 6) 소형 및 박형화이다.

액추에이터가 현대산업의 핵심 부품으로 자리매김함에 따라 요구되는 특성 역시 산업의 발전방향과 일치하고 있다. 1990년 부터 나노 기술의 급격한 발전과 더불어 이에 부응하는 고 해상도에 대한 요구가 증가되고 있으나, 다른 한편에서는 다기능에 대한 요구 및 대 변위를 필요로 하는 산업 역시 확대되고 있다. 이러한 기술 동향은 Fig. 3에서 확인 할 수 있으며, 본 연구에서는 고 해상도, 소형화, 대변위를 모두 만족시킬수 있는 추진체계를 갖추고자 하였다.

5. 세부 기술 및 추진 체계

본 연구의 최종 목표를 달성하기 위하여 총 4개의 세부 기술을 도출하였으며, 한국세라믹기술원에서 전체 연구를 조율하는 역할을 담당하고 있다.

제 1 세부과제는 밀리급 변형을 무연계 내환경성 세라믹 소재 임계 성능 구현 기술로 한국세라믹기술원에서 주관이 되어 연구가 진행중이며, 미세구조 제어를 연구 중인 제 2 세부과제와 매우 긴밀한 협조가 이루어 지고 있다. 제 1 세부과제로부터 개발된 소재는 제 3, 4 세부 기관에 제공되어 macro-actuator와 micro-actuator 제조를 위한 공정에 기본 소재로 이용되고 있다. 본 연구의 핵심은 무연계 세라믹 액추에이터용 소재의 임계 성능을 구현하고자 하는 연구로, 이를 위하여 Electronic charge density simulation을 통한 결정구조 예측 및 도메인 엔지니어링을 통해 무연계 압전 세라믹스의 상용화에 걸림돌이 되고 있는 온도 안정성과 성능향상을 동시에 이루

어 내고자 하고 있다. 또한 다강성 소재의 경우, 상온부근에서 응용이 가능한 성질을 보이는 물질은 대부분 자성체, 유전체를 인위적으로 결합한 복합 구조를 가진 나노구조, 복합물(composite), 다층구조물(multilayer)이다. 다른 특성의 소재를 복합화 또는 이종 적층함으로써 다기능의 소재를 구현하는 기술은 미래의 수요 트렌드와 잘 부합하여 파급효과가 매우 큰 기술로 판단되며, 다기능의 액추에이터/센서를 구현하는 기반이 되는 원천기술이라 할 수 있다.

제 2 세부과제는 무연 세라믹 초미세 분말합성 및 미세구조 제어 기술이다. 액추에이터용 세라믹스의 성능은 사용하는 원료 분말의 특성과 제조 공정에 따른 미세구조에 크게 의존한다. 따라서 원료 분말의 입도가 미세하면 소결 온도를 낮출 수 있으므로 고온에서 소결하는 과정에서 구성 성분 원소가 휘발되는 현상을 방지하여 소결체의 치밀화를 용이하게 달성할 수 있다. 국외에서는 고상법과 액상법 등 다양한 공정을 이용하여 무연 세라믹 분말 합성 연구가 수행되고 있으나, 국내에서는 고상법으로 합성된 분말을 사용하고 있을 뿐 분말 합성을 위한 다양한 공정에 연구는 미흡한 실정이다. 또한 무연 세라믹스 미세구조 제어 연구는 특성 향상을 위해 반드시 개발되어야 할 핵심 기술이나, 국내에서는 부품의 설계 변경을 통해 특성을 향상시키려는 연구가 주로 수행되어 왔다. 따라서 무연 세라믹 초미세 분말 합성과 미세구조 제어에 필요한 원천 기술이 체계적으로 개발되어야 한다. 이 과제는 재료연구소에서 수행중에 있다.

제 3 세부과제는 매크로 액추에이터용 고적층 무연 압전소자 동시소성 기술로 한국전기연구원에서 연구를 진행하고 있다. 액추에이터 기술은 저 전압화, 저 가격화, 친환경화 되어가고 있으며, 저전압형 액추에이터를 제작하기 위해서는 후막 두께를 얇게 해야 한다. 그러나 종래의 테이프 제작 방법을 사용하면 얇은 후막을 제작시 세라믹 밀도를 감소해야 하며 이로 인하여 안정된 액추에이터용 세라믹 극막 제작이 어렵다. 이러한 극막을 제작하기 위하여 새로운 막 제작공정 기술을 개발해야 한다. 또한 적층 구조의 액추에이터 소재에서는 세라믹과 함께 사용하는 전극물질로 귀금속의 일종인 은 혹은 은 합금

이 사용되고 있다. 이러한 고가의 전극물질은 액추에이터의 가격을 상승시키는 원인으로 작용하므로 새로운 저가의 전극 물질 개발, 세라믹-전극 적층체의 환원성 분위기 소성기술이 확립되어야 한다. 따라서 액추에이터용 극막 세라믹 슈트 제작 및 적층, 환원성 분위기 소성에 필요한 원천기술이 개발되어야 한다.

제 4 세부과제는 IT/BT용 마이크로 액추에이터용 3차원 형상 무연 압전소자 공정 기술이다. 액추에이터의 소형화에 따른 성능의 개선과 요구되는 가공 공정을 만족하기 위해 MEMS/LIGA 제작기술을 접목하여 매우 작으면서도 성능이 우수한 Actuating 구조를 개발하고 소자의 개발에 앞서 구현이 가능한 가공 기술 및 공정 기술을 개발해야 한다. 마이크로 액추에이터의 신뢰성 및 성능향상을 위한 중요인자는 박막에 인가되는 스트레스 제어와 균일하고 고밀도화 된 박막 제작이므로 특성을 최대화하기 위해 박막의 스트레스를 조절하는 기술과 균일성과 고밀도를 확보하기 위한 새로운 박막 제조 기술이

원천적으로 개발되어야 한다. 또한 3차원 형상 가공 기술, 새로운 박막 제조 기술 등을 이용하여 독창적이며 성능이 우수한 마이크로 액추에이터를 개발해야 한다. 본 과제는 전자부품연구원에서 주도적으로 수행중에 있다.

감사의 글

본고는 지식경제부 소재원천기술개발사업으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

●● 김병익



- 1992년 한양대학교 무기재료공학과 공학박사
- 1984년~1985년 금성전기(주) 연구원
- 1985년~1990년 KAIST 연구원
- 1986년~1987년 동경공업대학
- 1990년~1991년 The Penn. State Univ. MRL
- 1992년~현재 한국세라믹기술원 선임본부장