

## 민수 스마트 신소재인 압전 단결정의 군수 적용

이상구<sup>1\*</sup>, 양대준<sup>1</sup>, 조치영<sup>2</sup>, 이정민<sup>2</sup>, 서희선<sup>2</sup>  
(주)아이블포토닉스<sup>1</sup>, 국방과학연구소<sup>2</sup>

### Military application of a smart new material and piezoelectric single crystal

Sang-Goo Lee<sup>1\*</sup>, Dae Jun Yang<sup>1</sup>, Cheeyoung Joh<sup>2</sup>, Jung-Min Lee<sup>2</sup>, Hee-seon, Seo<sup>2</sup>

**Abstract** : 4차 산업혁명을 위한 하드웨어, 즉 인공지능, IoT, 자율 주행, 로봇, 스마트 팩토리 등 기술의 핵심은 센서이며 센서의 성능은 바로 핵심 소재가 좌우한다. 역사 속의 주요 기술 혁명은 열강들의 무기 개발 경쟁과정에서 발생했으며 이는 소재 혁신을 통해서 더욱 발전하였다. 이 기술들이 민수 기술로 이어져 그 나비효과는 엄청난 기술적, 산업적 패러다임을 변화시켰다. 본 논문에서는 4차 산업의 핵심인 스마트 소재, 그 중 최근 의료용 및 산업용 초음파 센서, 해군 전투함과 잠수함 소나 센서에서 이슈가 되고 있는 압전 단결정의 등장 배경과 최근 동향, 그리고 압전 단결정이 실제 센서에 적용되고 있는 다양한 사례에 대해서 설명하고자 한다. 마지막으로 압전 단결정 등 스마트 소재를 이용한 미래 군사기술의 게임 체인저를 위한 군사기술 개발 방향 대해서 서술하고자 한다.

**Key Words** : Smart material, Piezoelectric single crystal, SONAR, 4.0 Industry Revolution, Game changer

## 1. 개 요

과거 3차 산업혁명은 인터넷과 컴퓨터의 등장으로 시작되었는데 실제로 컴퓨터는 2차 세계대전 중 폰 노이먼이 원자폭탄 개발을 위한 맨하튼 프로젝트에서 핵융합을 계산하기 위한 수단을 고안하면서부터 시작되었다. 인터넷은 소련의 핵무기 위협 속에서 미국 안보에 도움이 되는 기술을 개발하는 과정에서 시작되었다. 사실 20세기부터 모든 첨단기술은 대부분 '밀리테크'(군사기술)에서 온 것이고 이는 대부분 미국이 주도 했다.

사실, 이 시기에 만들어진 컴퓨터와 인터넷이 4차 산업혁명의 근간이 되고 있음을 간과할 수 없다. 컴퓨터의 등장 이후 컴퓨터의 전산 능력을 증대시키기 위해 진공관에서부터, 트랜지스터, 반도체로 발전하는 과정에서 소재를 떼어 놓고서는 이야기 할 수 없다. 바로 소재의 패러다임 변화가 현재의 반도체를 발전시킨 것이다.

이와 유사하게 스마트 소재인 압전 소재의 발전 또한 제1차 세계대전을 전후하여 수정과 같은 천연 결정체를 사용한 잠수함 탐지용 소나 체계의 문제가 있어 새로운 합성 압전 재료를 연구하면서부터 발전하기 시작하였다. 즉, 세계적인 기술 혁명의 중심에는 국방 기술과 관련이 있으며 이는 소재의 변화를 통해 가능한 것이었다.

이하 본문에서는 4차 산업의 핵심인 스마트 소재, 그 중 최근 의료용 및 산업용 초음파 센서, 해군 전투함과 잠수함 소나 센서에서 이슈가 되고 있는 압전 단결정의 등장 배경과 최근 동향, 그리고 압전 단결정이 실제 센서에 적용되고 있는 다양한 사례에 대해서 설명하고자 한다.

## 2. 압전 단결정 등장 배경 및 동향

1980년대부터 일본 동경 공대 Kuwata 교수 그룹을 시작으로 미국 DARPA에서는 바다 속의 잠수함을 더욱

잘 감지하고자 하는 SONAR를 개선하기 위한 신소재 개발을 지원했으며 Tom Shroud 교수 그룹에서 개발된 PZN-PT [ $\text{Pb}(\text{Zn}_{2/3}\text{Nb}_{1/3})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$ ]와 PMN-PT [ $\text{Pb}(\text{Mg}_{2/3}\text{Nb}_{1/3})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$ ] 단결정을 처음으로 제시하여 새로운 압전 소재 출현에 대한 기대를 받았다.<sup>1)</sup> 하지만 주요 연구개발이 PZN-PT를 중심으로 되었고 그 성장 방법 또한 Flux법으로 크기가 작고 단결정 양산에 문제가 많았다.

PMN-PT 압전 단결정은 저자가 1997년 스탠포드대학의 첨단소재연구소에 객원연구원으로 있는 동안 DARPA산하 미해군연구소(ONR, officer naval research)에서 발주한 신소재 개발을 위한 기초연구에 참여한 것이 기회가 되었고 PMN 계열의 압전 단결정 양산법(브리지만 성장법)을 세계 최초로 시연하였다.

이를 계기로 납계열(Pb를 포함하는 산화물) 대형 압전 단결정 성장이 가능해짐에 따라 전 세계적으로 PMN-PT로 연구방향이 전환되면서 본격적으로 연구가 시작되었으며 상용화되기 시작하였다.

표 1에서 보는 것과 같이 기존의 PZT 세라믹스에 비하여 월등히 우수한 압전 특성을 보이는 PMN-PT 및 PIN-PMN-PT 압전 단결정들은 "차세대 압전 재료"로 불리게 되었다. 현재 다양한 조성을 가지는 압전 단결정 소재가 개발되고 있으나, 특히 의료기 초음파 탐측 자용으로는 1세대 단결정인 2상 단결정(PMN-PT)이 고 출력/내환경 성능이 요구되는 군사용 소나 센서용으로는 2세대 단결정인 3상 단결정(PIN-PMN-PT) 소재가 널리 사용되고 있다.<sup>2)</sup>

미국은 DARPA 산하 미해군연구소(ONR)를 중심으로 압전 단결정 연구에 대한 지원이 지속적으로 이뤄지고 있으며 펜실베이니아 주립대학을 중심으로 압전단결정 소재에 대한 연구가 진행 중이다 이다. 2000년 초반 당시 우리나라 압전 단결정 기술을 모방한 2개의 회사(HC materials, TRS Technologies)는 DARPA의 신소재에 대한 지속적인 연구 개발지원과 대기업의 신규 투자를 받는 동시에 필립스 등 의료용 매출을 통해 성장

을 하고 군수용 개발 과제에도 꾸준히 참여하여 양산 능력 증대와 기술 개발을 지속하였다.

**Table 1. Comparison of piezoelectric ceramic and single crystal**

	압전상수 (pC/N)	전기기계결합계수	유전율	항전계 (kV/cm)	상전이 온도 (°C)
PZT	593	0.42	3,400	6.5	193 (Tc)
PMN-PT (1세대 단결정)	1,500~2,000	> 0.89	4,000~7,500	1.9~2.5	85~100
PIN-PMN-PT (2세대 단결정)	1,300~1,800	> 0.89	4,000~6,000	4~6	110~130

가장 앞선 양산 능력을 바탕으로 하여 HC material 사는 2013년 해군용 센서 개발업체인 CTG에 인수되었고 이후 2016년 또 한 번의 인수를 통해 CTS라는 세계적 압전 세라믹 센서 전문 기업에 인수되면서 세계적 마케팅 기반과 군수용 생산의 기반을 마련하게 된다. CTS사는 현재 홈페이지와 white paper를 통해 압전 단결정에 대한 군수용 사용이 되고 있음을 전 세계에 알리고 있다. 또 한 회사인 TRS Technologies는 지난 2017년에 일본의 압전 세라믹 소재 전문 대기업인 TAYCA에 인수되었다.

일본 내에서는 80년대 초기 Kawatetsu mining이라는 작은 회사가 압전 단결정을 생산하기 시작하였으나 2004년 대규모 철강회사인 JFE mineral사에 인수되어 양산 능력을 확보하였다.

국내에서 가장 먼저 3인치 크기를 압전 단결정을 생산하여 의료용 초음파 진단기에 적용하여 수출을 주도 하였으나 후발주자인 미국과 일본은 정부 지원 및 M&A를 통한 공격적인 투자를 통해 4인치 생산을 시작 하였으며 생산 능력 및 가격 경쟁력으로 시장 점유율을 확대하고 있다. 국내에서도 2019년 5월 마침내 국방 과학연구소의 지원으로 세계 최대 직경의 4인치 급 이상을 생산 할 수 있는 기술을 확보하게 되었다.

중국은 국영 연구소인 Shanghai Institute of Ceramics(SICCAS)에서 PMN-PT 단결정 성장기술과 초음파 트랜스듀서, actuator 소재 기술을 개발하고 있는 것으로 알려져 있으며 90년대부터 미국의 압전 단결정 연구에 참여했던 자국 연구원을 최근 모두 끌어들이 국가적 차원의 대규모 지원이 이루어지고 있는 상황이다.

유럽에서는 납에 대한 환경 규제 문제로 압전 단결정 소재를 생산하는 업체가 없어 연구개발에 소요되는 압전단결정 소재를 국외에서 수입하여 사용할 수밖에 없으며 미국의 압전단결정 수출 제한조치로 최근 양산 능력이 입증된 한국의 회사를 통한 안정적인 공급처를 확보하려고 하고 있는 상황이다.

### 3. 압전 단결정 적용 사례

#### 3.1. SONAR용 수중음향센서

PMN-PT(1세대 단결정), PIN-PMN-PT(2세대 단결정) 등 압전 단결정 소재의 SONAR 센서 응용에서의 가장 큰 장점으로는 높은 압전상수와 낮은 탄성계수의

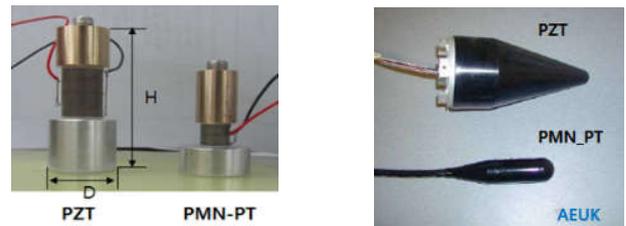
민수 스마트 신소재인 압전 단결정의 군수 적용

물성치로 인해 고효율, 고출력, 광대역의 음향성능 뿐만 아니라 기구적으로 소형화 및 경량화가 가능하다. 즉 하나의 센서를 통해 좀 더 넓은 주파수의 이용이 가능하므로 음향센서의 크기와 수를 줄일 수 있어 잠수함이나 함정의 운용효과와 효율을 증대시킬 수 있다.

미해군수중전투센터(NUWC)의 연구결과에서도 압전 단결정을 이용한 SONAR용 수중음향센서의 경우 아래 표와 같이 소재의 성능차이로 인하여 저주파 설계 가능하여 함정의 탐지거리가 더욱 증가하고 초광대역 설계로 탐지주파수 대역이 획기적으로 증가(6배 이상)하고 고출력 송신이 가능하여 동일 출력대비 소요 전력이 저감될 뿐만 아니라 파워앰프 규격을 최소화 할 수 있다고 발표하였다.(NUWC, 2015)<sup>3)</sup>

실제로 아래 그림 1에서와 같이 국내회사(아이블포토닉스)에서 시험적으로 제작한 SONAR 센서의 경우 동일한 주파수 대역에서 무게와 부피가 각각 1/2로 줄어들음을 확인하였다. 이밖에도 영국의 Atlas사에서 압전 단결정을 적용한 기만기용 음향센서의 경우도 그림과 같이 획기적으로 줄어듦을 확인할 수 있다.

이러한 장점을 활용하면 고출력/광대역 송신신호 출력이 요구되는 부유식 혹은 자항식 기만기용 음향센서에 적용하는 것이 매우 효과적일 수 있다. 미국의 군수업체인 Ultra Electronics사에서 제작한 수중 하이드로폰사레에서도 크기가 줄어들면서 수신 성능이 대폭 향상되었음을 확인할 수 있다



(a)국내 SONAR 센서 (b)영국 기만기용 센서

**Fig. 1. SONAR sensors (PZT vs. PMN-PT)**

군수 무기체계 특히 해군의 무기체계에 있어 SONAR 성능의 차이는 공격과 방어 능력의 차이와 직결 되므로 최고 성능의 SONAR 부품 및 시스템을 생산하는 업체, 국가만이 무기수출에 있어 독점적인 지위에 있을 수 있다. 그러므로 압전 단결정을 이용한 UUV용 SONAR 센서 및 수중 센서에 대한 연구개발이 전 세계적으로 활발히 진행될 것으로 예상된다.

#### 3.2. 의료/산업용 초음파 센서

초음파 센서의 주파수 대역폭과 관련 있는 압전 특성은 전기기계결합계수(k33)이고 전기 신호 감도와 관련 있는 압전 특성은 압전 상수(d33)및 유전상수(ε33)이다. PMN-PT 압전 단결정은 전기기계결합계수(k33)의 값이 PZT 세라믹의 값보다 30%이상 크고 압전 상수 및 유전상수의 값이 3배 이상이다. 그러므로 아래 그림 2와 같이 넓은 대역폭(broad bandwidth)이 가능하여 한 개의 중심주파수를 갖는 음향센서로 좀 더 넓은 범위의 주파수 범위를 탐지할 수 있어 기존의 2개 음향센서로 탐지하던 범위를 한 개의 음향센서로 탐지할 수 있으며 우수한 감도 (sensitivity)를 나타내므로 작은 신호까지 탐지할 수 있어 영상이미지를 한층 더 개선할 수 있다.

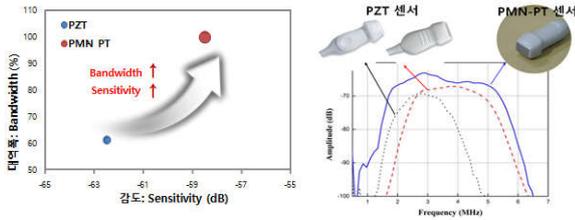


Fig. 2. Medical sensors (PZT vs. PMN-PT)

압전 단결정을 이용한 의료용 초음파 프로브는 국내에서도 이미 상용화 되어 휴먼스캔, 삼성메디슨, 알피니언 등에서 생산하고 있는 상황이다.

철강이나 자동차 산업, 반도체 검사에서 널리 사용되고 있는 검사 방법인 비파괴 초음파 검사 분야에서도 압전 단결정을 이용한 초음파 탐촉자에 대한 상용화가 활발하게 진행되고 있다. 이미 독일 Fraunhofer 연구소와 국내 아이블포토닉스에서는 국제공동연구를 통하여 철강 내부결함탐지용 압전단결정 복합체를 이용한 5 MHz Phased Array를 상용화 하였으며 기존 PZT 압전 세라믹 대비 감도 12dB(약 5배), 대역폭 30% 증가하여 미세 결함까지 탐지할 수 있다고 발표하였다.<sup>4)</sup>

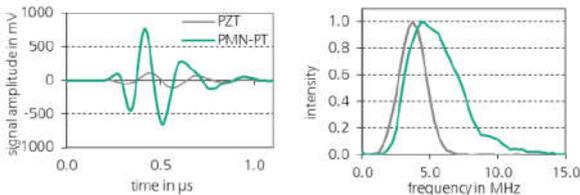


Fig. 3. NDT sensor (PZT vs. PMN-PT)

이러한 비파괴 검사 영역은 국방 분야에서도 매우 중요한 영역이다. 항공우주산업과 군사산업에서는 초경합금재료나 신구조재료가 많이 사용되는데 설계제작 후에 비파괴검사가 필수적이다. 따라서 압전단결정을 이용한 비파괴 초음파 탐촉자 군수용 부품 소재의 비파괴 검사 및 항공기용 복합소재 비파괴검사에도 활용할 수 있을 것으로 예상된다.

### 3.3. 압전 MEMS 센서

압전 박막을 MEMS 소자로 응용하기 위한 연구는 90년대 중 반부터 전 세계적으로 다양한 제품을 목표로 진행되었으며, 실제로 전통적인 ZnO, AlN 압전 박막을 비롯하여 강유전체의 대표적인 PZT 박막은 반도체 기술의 발달로 인하여 압전 MEMS 소자에 응용이 되고 있다. 압전 특성에 기반한 MEMS 소자는 무선 통신용 공진기와 필터, 공진기반 화학 및 생화학센서, 적외선 감지기, 가속도계와 각속도계, 자이로스코프, 마이크로 초음파 변환기(p-MUT), IoT 전원용 에너지하베스트 등이 있다.

하지만, 이러한 압전 MEMS 소자에서 가장 중요한

민수 스마트 신소재인 압전 단결정의 군수 적용

것은 압전 박막의 물성이다. 압전 물성이 우수할수록 작은 전압에서도 높은 강도의 신호가 발생하며, 외부의 미세한 환경의 변화(예를 들면, 속도, 온도, 소리 등의 변화)에 대해서 높은 전기를 발생할 수 있다. 따라서, 많은 연구그룹에서 PMN-PT나 PIN-PMN-PT 등 우수한 압전 단결정을 MEMS 소자에 적용하려는 연구개발이 진행 중이며 우수한 압전 특성이 가시화 되고 있어 응용이 점차 확대될 전망이다.

실제로, 국내의 아이블포토닉스사는 그림과 같이 실리콘 기판위에 PMN-PT를 박막을 형성하여 국내외 여러 연구기관들과 함께 압전 MEMS 소자를 공동 연구하여 그 실용성을 입증하고 있다. (그림 4 참조)

- 미국 UC. Davis : PMN-PT 박막을 이용한 Deformable mirror
- 미국 Q사 : 1GHz MEMS resonator

현재는 압전 박막 MEMS 기술의 군사적 응용을 위한 도전 과제로서 공진형 MEMS 가속도계와 자이로센서 등의 개발이 미국 DARPA를 비롯하여 국내외 연구소에서 적극적으로 연구하고 있다.

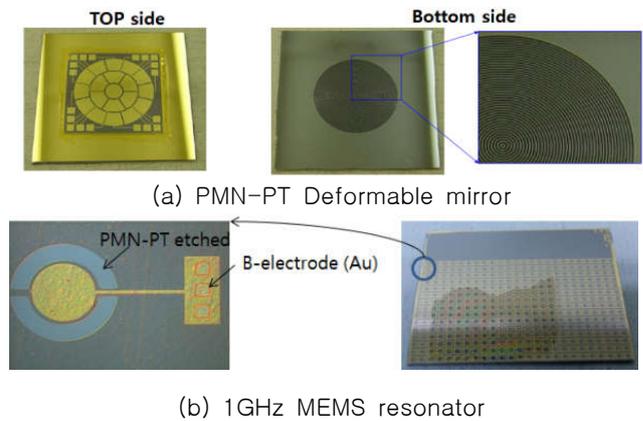


Fig. 4. PMN-PT MEMS sensors

### 3.4. 에너지 하베스트

4차 산업혁명을 통해 집안의 각종 센서·자동차·스마트폰과 액세서리 등 만물이 전자기기화 되고 또 서로 데이터를 주고받는다는 `사물인터넷(Internet of Things)` 시대가 오면서 각종 센서의 전원 문제가 대두되고 있다. 이들 전원의 문제를 주변 환경으로부터 물리적 에너지를 이용하여 에너지를 수확하는 에너지 하베스팅 기술을 적용하려는 연구는 지금까지도 계속되고 있다.

에너지 하베스팅 기술의 발전을 위해서는 소자의 구조, 에너지 변환 회로, 시스템 설계 등의 많은 고려사항이 있으나 이 중 가장 근본적인 성능 향상은 소재 자체의 특성개선에 달려있다. 이 분야에서도 기존 PZT 소재는 발전량이 미비하여 상용화 및 연구에 큰 발전을 가져오지 못하고 있는 실정이었다. 이에 비하여 PMN-PT 압전 단결정의 발전 특성은(그림 5 참조) 기존 소재인 PZT 압전 세라믹보다 3~10배 정도의 높아 휴대용 전자기기 및 무선 전자 시스템의 새로운 에너지원으로 부상하고 있으며 에너지 변환 효율이 크고 소형·경량화가 가능하며 다양한 영역에 응용이 가능하다는 장점 때문에 각광을 받고 있다.

실제로 아이블포토닉스는 실제 생활에서 충전이 가능한 카드형 에너지 하베스트 및 무전원 무선스위치를

개발하였고 현재는 배터리 없는 무선리모콘의 시제품을 만들기도 하였다. (그림 6 참조)

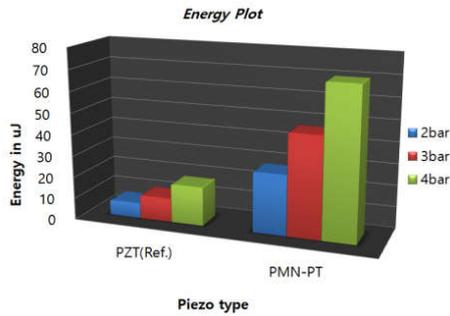


Fig. 5. Generating energy from PZT vs. PMN-PT

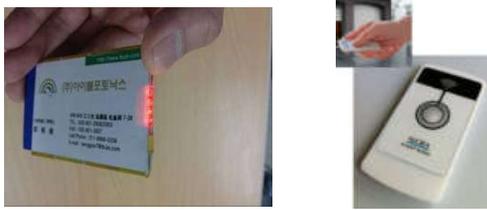


Fig. 6. Card type energy harvester and wireless on/off switch

압전체를 이용한 에너지 하베스팅 연구를 통해 미래에는 압전 하베스터를 이용 스마트폰 및 휴대 기기, IoT 센서 등을 전원 걱정 없이 언제 어디서든 충전하여 사용할 수 있으며, 대체 에너지로서 기존 에너지 고갈에 대한 걱정이 없어질 뿐만 아니라 영구적이며 친환경 에너지이기에 환경도 보호할 수 있다. 국방 분야에 있어서 배터리 등의 무게가 많이 나가는 무기나 장비의 일부 또는 전부 대한 보조전원 및 무인 로봇의 전원으로 활용이 가능하므로 미래 전쟁의 무인화를 대비할 수 있는 것으로 예상된다.

4. 결론

역사 속의 주요 기술 혁명은 열강들의 무기 개발 경쟁과정에서 발생했으며 이는 소재 혁신을 통해서 더욱 발전하였다. 이 기술들이 민수 기술로 이어져 그 나비효과는 엄청난 기술적, 산업적 패러다임을 변화시켰다. 이것이 미국과 독일 등 선진국들이 적극적으로 소재 개발 플랫폼을 구축하고자 하는 이유다.

혁명적인 기술은 소재로부터 출발한다. 상대적으로 늦었지만 국가차원의 소재 플랫폼을 위한 인프라, 시스템을 구축하는 본격적인 작업이 추진되어야 한다. 우리나라도 뒤 늦게나마 스마트 소재 산업의 중요성을 인식하기 시작했다. 과거의 시행착오를 반면교사로 삼아, 보다 신속하고 효율적으로, 그리고 현명한 정책을 수립하고 추진해야 한다.

이제는 소재를 중심축에 두고, 센서/부품 업체, 시스템 업체를 참여시키고 해외 수요기업도 연계된, 통합형 국제적, 융합센서 개발 사업이 매우 중요하게 생각되는 시점이 되었다.

DARPA의 소재 연구 프로세스와 마찬가지로 스마트 소재인 압전단결정 소재 원천 기술을 바탕으로 한 생산, 연구 R&D 플랫폼을 구축하고 이를 바탕으로 한 무기 체계 센서/시스템을 선도적 개발을 우선적으로 진행

해야 한다. 그리하면 군사선진국인 미국, 일본 중국과 대등한, 게임 체인저 수준의 전력 확보가 가능하며 세계 방산시장에서 기술적 선점과 경쟁력을 확보할 수 있으며 유럽/동남아 지역에서는 국제공동연구 및 절충교역 확대를 통해 압전 단결정을 적용한 국산 무기체계 수출 확대가 가능할 것이다.

후 기

이 논문은 국방기술품질원이 지원한 ‘글로벌 방산강소기업 육성사업’(과제번호:E170001) 및 산업통산자원부가 지원한 ‘산업기술국제협력 국제공동기술개발사업’(과제번호:P0005431)으로 지원을 받아 수행된 연구 결과입니다.

참고문헌

- 1) Seung-Eek Park, and Thomas R. Shrout, "Ultra-high strain and piezoelectric behavior in relaxor based ferroelectric single crystals" An Alternative Computing Algorithm of the Penalized Weighted Residual Method for the Structural Dynamics," Journal of Applied Physics, Vol. 82. 1997, pp. 1804~1811
- 2) Ho Yong Lee, "Development and application of high efficient piezoelectric single crystals", Ceramist, Vol. 17. No.2, 2014, pp. 7~13
- 3) Lynn M. Ewart, et, al, "Generation II PiezoCrystal Material Properties And PiezoCrystal Applications", The International Symposium on Piezocrystals and their Applications, 2015
- 4) Susan Walter, Thomas Herzog, Frank Schubert, Henning Heuer, Tae-Young Han, Sang-Goo Lee, Hee Man Chae, CheeYoung Joh, Hee-Seon Seo, "Investigations of PMN-PT Composites for High Sensitive Ultrasonic Phased Array Probes in NDE", 2015 IEEE SENSORS-Proceedings, 2015