

에너지 하베스팅용 압전 단결정 기술 개발 동향

김민수 선임연구원, 정순종 책임연구원 (한국전기연구원 재료응용연구본부)
이호용 교수 (선문대학교 신소재공학과) | 강석중 교수 (KAIST 신소재공학과)

1. 서론

친환경과 대체에너지가 전 세계적인 화두가 되고 있는 가운데 에너지 하베스팅 기술이 많은 관심을 모으고 있다. 에너지 하베스팅은 바람, 파도, 태양광, 온도변화, 진동 등 주변 환경으로부터 에너지를 얻어내는 에너지 획득방식을 뜻한다. 주변 환경으로부터 얻을 수 있는 에너지는 태양 에너지, 풍력 에너지, 열전 에너지 등 여러 형태가 있겠으나, 최근 압전소재를 활용해 압력이나 진동 등 물리적인 에너지를 전기 에너지로 전환해 저장, 활용하는 압전 에너지 하베스팅 기술이 주목을 받고 있다. 상대적으로 높은 전력밀도와 자연환경에 크게 영향을 받지 않는 등의 다양한 가능성으로 많은 연구들이 진행되고 있다 [1-3].

전 세계적인 친환경 신재생 에너지 열풍과 함께 압전 에너지 하베스팅 기술이 각광받고 있으며 현재 다양한 방향으로 연구되고 있다. 압전 에너지 하베스팅 기술은 주변의 소음과 진동, 구부러짐과 같은 불연속적인 힘을 전기로 변환해 저장하는 친환경 기술이다. 자연 속에 그냥 버려지고 있는 에너지를 수확하여 활용하는 압전 에너지 하베스팅 분야는 MIT의 Technology Review를 통해 2009년 10대 유망기술에 선정되기도 하였다 [4]. 특히 앞으로 열릴 유비쿼터스 시대에 있어 센서 네트워크를 구동할 전원 공급 장치로 압전 에너지 하베스팅 기술이 가장 가능성 있는 대안으로 제시되고 있다. 이는 광범위한 범위에 분포할 센서를 전선으로 연결하거나 배터리를 이용

하여 구동하는 것이 매우 어렵기 때문이다 [3].

그러나 현재까지의 압전 에너지 하베스팅 기술은 실질적인 상용화 단계라기보다는 실험적인 차원으로, 상용화를 위해서는 압전 소재의 낮은 발전량의 문제가 극복되어야 한다. 통상적으로 센서의 동작, 신호처리, 무선통신 등에는 대략 50 mW 정도의 전력이 필요한데 이를 위해서는 현재 기술 수준 대비 최소 100배 이상의 전력이 필요한 상황이다. 따라서 이를 극복하기 위한 신소재 및 대전력 발생구조 등에 대한 집중 연구가 필요하다.

2. 고출력 압전형 에너지 하베스팅 기술

유럽의 친환경 나이트 클럽, 일본의 에너지 하베스팅 모듈 설치 다리, 영국의 군사 장비, 미국의 압전 에너지 하베스팅 소자 등이 세계적인 우수 연구사례로 꼽힌다. 친환경 나이트클럽으로 혁신을 시도하며 에너지를 살뜰히 모아 사용하고 있는 곳으로는 영국의 친환경 클럽 수리야 (Surya)와 네덜란드 클럽 와트 (WATT)가 있다 [5]. 화려한 조명과 음악 소리로 가득한 나이트클럽은 대표적인 에너지 과소비 공간이다. 나이트클럽의 전력 사용량은 일반 가정의 150배나 된다고 한다. 하지만 이 친환경 나이트클럽들은 SDA (Sustainable Dance Club) 즉, 지속가능한 댄스 클럽이라고 불리며, 사람들이 춤을 출 때 바닥에 전달되는 진동을 전기에너지로 변환하는 자가발전 설비를 통해 일반 나이트클럽들에 비해 에너지 소비

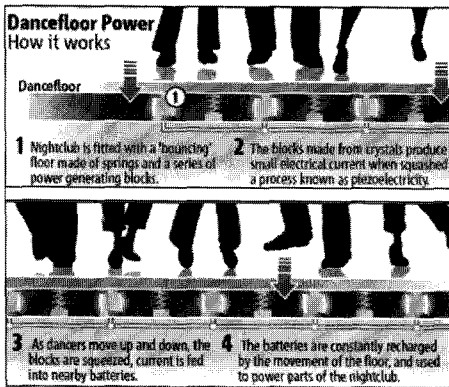


량을 30%까지 줄이는 것을 목표로 하고 있다.

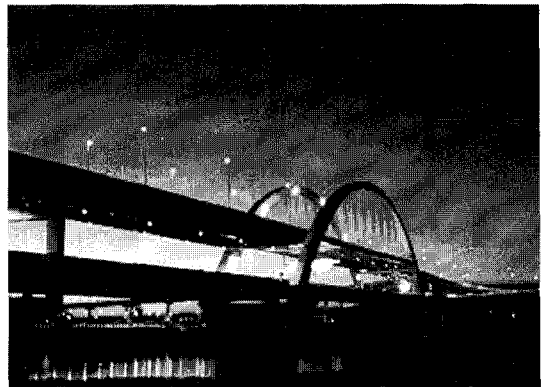
일본 도쿄 아라가와에 있는 고시키사쿠라대교(五色櫻大橋)는 다리에 설치한 압전 에너지 하베스팅 모듈을 통해 차량 움직임에 의해 발생하는 진동을 전기 에너지로 저장하고 있다 [6]. 저장된 전기 에너지는 일몰 후 도로, 교량의 전원으로 사용된다. 가로 61 cm 세로 30 cm의 에너지 하베스팅 모듈 10대를 설치하여 얻는 전력은 겨우 0.1 Wh로 일주일동안 충전해도 20 W 전구를 한 시간도 점등할 수 없는 미약한 전력량이다. 그러나 도쿄의 도시 고속도로를 운영하고 있는 (주)수도고속도로는 향후 기술개발에 의해 현재의 100배 정도까지 발전량을 높일 수 있다고 보고 있다. 이 경우 도쿄 수도고속도로의 터널을 제외한 235 km에 에너지 하베스팅 모듈을 설치한다고 가정

했을 때 도쿄 23구 약 400만 가구 사용전력의 약 40%를 충당할 수 있게 된다. 또한 압전 소자의 수명이 길기 때문에 일단 에너지 하베스팅 모듈을 설치하기만 한다면 장기적으로는 비용이 절감된다고 보고 있다. 도로의 진동을 에너지원으로 이용하므로 별도의 비용이 들지 않는 자가 발전이라는 측면에서 이산화탄소 감량과도 연결되기 때문에 앞으로도 기술 개발을 계속적으로 추진할 것이라고 밝혔다.

영국 Leeds 대학교 연구원들도 행진을 하는 군인들로부터 동력에너지를 획득할 수 있는 시스템을 개발하고 있다 [7]. 150만 달러가 소요되는 이 계획은 인간의 에너지를 군사 분야의 적용을 위한 유용한 전력으로 전환하는 방법을 찾는 데 초점을 맞추고 있다. '배터리가 필요 없는 군인 프로젝트'의 일환으



(a)



(a)



(b)



(b)

그림 1. 압력발전기를 통한 전기 생성 과정, 클럽 왓트 [5].

그림 2. 고시키사쿠라 대교와 압전 모듈 설치 모습 [6].

로 수행되고 있는 이 연구는 압전 변환기로서 작동할 수 있는 수정과 고기능 세라믹 재료 무릎 보호대와 배낭 혁대를 포함한 동력화 시스템을 개발하고 있다. 이 압전 부품들은 군인이 걷고 움직이면서 자연히 발생하는 기계적 에너지를 전기 에너지로 변환해 충전하는 역할을 하게 된다. 보통 보병이 들고 다니는 75 kg의 군장 중 배터리 형태의 전원은 10 kg를 차지하고 있다. 따라서 시스템이 개발되면 친환경 신재생 에너지 사용이 가능해짐은 물론 군인의 군장 무게를 15퍼센트나 절감할 수 있게 된다. 또한, 이러한 기술은 군사 분야에서 다양하게 적용 가능한 잠재성을 갖고 있다.

미국에서도 안전 에너지 하베스팅에 관한 연구개발이 많이 이루어지고 있다. MIT에서 에너지 변환 세라믹 및 고분자 소자를 채용한 신발 구조물을 개발하여 1~5 mW 정도의 에너지를 획득하였고, ACI

사가 세계 최초로 복합재료를 이용하여 시작품을 개발하였다. SRI社에서도 복합 고분자 소자를 이용하여 군사용 자가 충전 신발을 약 20 mW급 시험품으로 개발 성공하였고, DARPA 주관 하에 학계와 국방 관련 기업 및 민간 기업에서는 압전형 발전 소자를 중점적으로 연구하고 있다.

미국은 관련 기술 확보를 위한 마이크로 설계 제작 기술 개발을 위하여 MIT 및 기타 벤처 기업들이 표준 샘플 제작을 하고 있다. 일본은 NEC, Tokin 등에서 하베스팅 시스템에 대해 학술적으로 접근하고 있으며, 이를 바탕으로 진동설계 및 그 소재에 대한 요소기술을 확보해 나아가고 있다. 기초 요소기술을 보유하고 있는 미국, 일본, 독일 등이 다양한 응용기술 관련 특허 기술도 보유하고 있으며, 그 밖에도 각종 에너지 변환 세라믹 조성의 제조 기술 및 공정 기술을 확보하여, USN, 헬스케어, 로봇, 군수 관련 연구 및 첨단 전자 부품 생산까지 적극 활용해 신제품 시장을 이끌어 가고 있다. 하지만 아직까지 에너지 하베스팅 기술이 상업적 완성 단계에 이르지 못하고 있다.

국내 연구진에 의한 고출력 에너지 하베스팅 소자에 대한 연구는 극히 일부 대학 및 연구소에서 초보적인 연구를 하고 있는 실정이다. 한국전기연구원이 적층형상의 소자를 직렬로 배열한 매트를 제작하고 도보 시에 매트로부터 발생하는 에너지를 조사 중이며, 세라믹기술원 연구팀이 벤더형상의 에너지 하베스팅 소자를 개발 중이다.

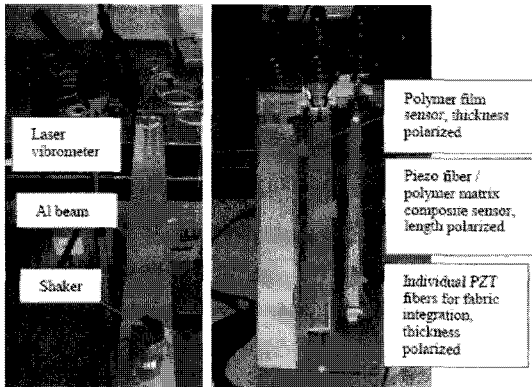


그림 3. 에너지 하베스팅 세라믹스 복합소재 (미국 ACI).

표 1. 미국 연구 개발 사업 현황.

프로젝트	DARPA	DARPA	California commission	DARPA/NSF
연구 분야	에너지변환 fiber composite	에너지 변환 shoes	캔티레버	ZnO piezoelectric semiconductor - nanogenerator
연구 기관	Georgia Tech	SRI	UC Berkeley	Georgia Tech
참여 회사	Advanced Ceramics, Eeonyx Corporation	SRI, MIT	.	.

3. 압전 단결정 제조공정 기술

압전소재의 에너지 변환 특성은 결정방위에 따라 큰 차이가 나기 때문에 특정 방위를 구현할 수 있다면 뛰어난 성능의 소자를 제조할 수 있다 [8]. 이러한 이유로 단결정에 관한 연구가 많이 진행되고 있으나, 그 제조방법이 까다롭고, 고온에서 장시간의 열처리가 필요하여 경제성이 낮은 단점도 있다.

최근 들어 에너지 하베스팅 기술에 대한 관심이 높아지면서, 충격 또는 진동 등 기계적 에너지를 하베스팅하여 전기 에너지로 활용하려는 기술이 개발

되고 있다. 특히, 단결정의 단위 부피 당 출력 밀도가 매우 높아 단결정을 이용한 진동 에너지 하베스팅 기술에 대한 연구개발이 세계적으로 각광받고 있다. 미국 Penn. State Univ.에서 단결정의 에너지 하베스팅 출력 밀도가 다결정체 또는, 다른 에너지 하베스팅 소자보다 단위 부피 당 출력 밀도가 매우 높다고 보고하였으며, 단결정을 이용한 복합소재 개발에도 박차를 가하고 있다 [9, 10].

표 2. 압전 단결정과 다결정의 물질 특성 비교 (TRS) [8].

Item	Symbol	Unit	PZN-PT Single Crystals	PZT Ceramics	Remarks
Density	ρ	10^3 kg/m^3	8.35	7.66	-
Dielectric Constant	$\epsilon_{33T}/\epsilon_0$	-	2,500-4,000	500-5,000	1 kHz
Dielectric Loss	$\tan \delta$	%	< 1.0	1-3	1 kHz
E/M Coupling Coefficients	k_t	%	56-60	45-55	14x27x0.26 mm
	k_{33}	%	92-95	60-80	4x4x12 mm
	k_{31}	%	75-81	30-45	2x12x0.5 mm
Piezoelectric Strain Constants	d_{33}	pC/N	2,200-2,500	200-800	4x4x12 mm
	d_{31}	pC/N	1,500-1,700	200-400	2x12x0.5 mm
Piezoelectric Charge Constant	g_{33}	10^{-3}Vm/N	50-60	17-28	4x4x12 mm
Acoustic Velocity	v_{33}	m/s	2,760	3,900	4x4x12 mm
Acoustic Impedance	z_{33}	$10^5 \text{ kg/m}^2\text{s}$	23	30	4x4x12 mm
Curie Temperature	T_c	$^{\circ}\text{C}$	170-180	120-350	-

이런 가운데, 우리나라에서 개발된 고상단결정성장법 (Solid-state Single Crystal Growth, SSCG) 기술이 압전 에너지 하베스팅의 본격적인 실용화를 이끌어낼 수 있을 핵심기술로 주목받고 있다. 기존의 단결정제조방법인 브리지만 (Bridgman)법은 여러 소재들의 조성을 맞춰 1000°C 이상의 고온에 녹여 액체 상태로 만든 후 고체 단결정 핵을 넣어 식히면서 동일한 단결정으로 성장시키는 방법으로, 고가의 백금, 로듐 용기가 필요할 뿐만 아니라 자칫 다결정이 되기도 하는 등 문제점이 많고, 경제성이 떨어졌다. 특히 단결정 내 조성구배 문제는 심각한 문제로, 정확한 조성으로 제조가 어렵고, 성장된 단결정의 50% 이상을 사용하지 못하여 고비용의 큰 원인이 되고 있다 [11]. 이러한 여러 단점을 해결할 수 있는, 낮은 제조 원가, 대량생산용이, 단결정내 조성구배 없는 새로운 단결정 성장법이 고상단결정 성장법이다. 소재를 고열로 녹이는 공정이 필요 없어 제조비용도 낮고 수득율도 높고 제품 가격이 절반에서 최대 1/4까지 낮아 경제성이 훨씬 뛰어날 뿐 아니라 보다 폭넓은 소재 배합이 가능해 더욱 우수한 물성의 단결정소재 개발이 가능하다 [12-14].

고상단결정성장법은 일반적인 다결정 구조의 압전 소재보다 훨씬 우수한 특성을 가진 압전 단결정 소재를 효과적으로 제조할 수 있는 획기적인 기술이다. 고체상태의 다결정 소재 또는 소재 분말 속에 단

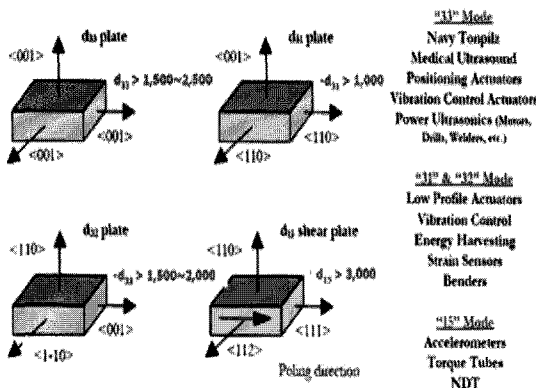


그림 4. 압전 단결정의 방위별 특성 및 응용 [8].

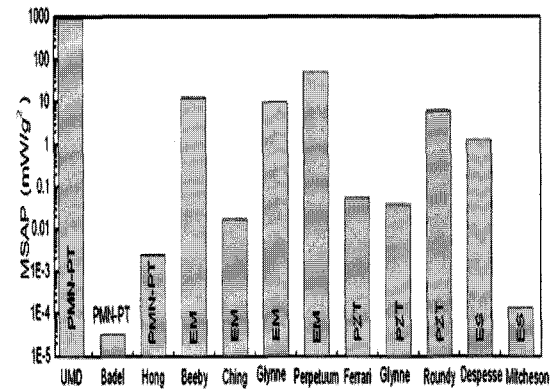
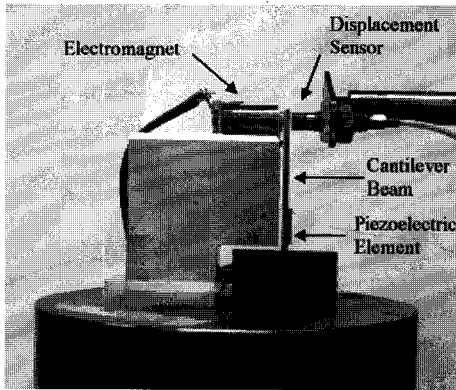


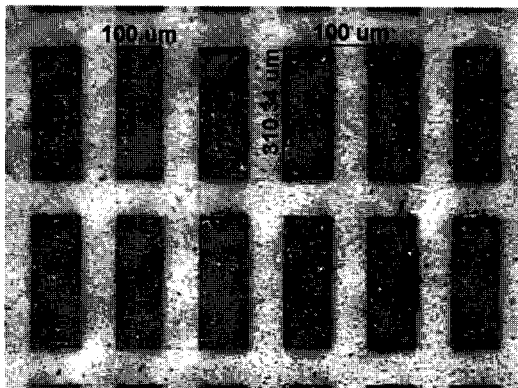
그림 5. PMN-PT 단결정과 다결정 및 다른 형태 소자의 에너지 하베스팅 성능 비교 [9] *EM: Electromagnetic, ES: Electrostatic, PZT: Polycrystal PZT Ceramics.

결정핵을 넣고 소재별 적절한 온도의 열처리를 통해 단결정을 성장시키는 방법이다. 다결정체의 열처리 중에 일어나는 비정상입자성장 현상을 이용하여 단결정핵을 다결정체와 접합하여 열처리를 통해 성장시켜 용융과정을 거치지 않고 소결공정을 이용하여 단결정을 제조한다. 고상단결정성장법에서는 다결정체내에서 일어나는 비정상입자성장 현상을 이해하는 것이 핵심이다 [12-14].

고상단결정성장법을 통해 제조하고 있는 압전 단결정 소재는 일반적인 다결정 압전 소재에 비해 월등히 뛰어난 특성을 제공할 수 있으므로 이를 에너지 하베스팅 소자에 적용할 경우 기존 압전 소재 대비 100배 이상의 전력을 제공해 그 동안 압전 에너지

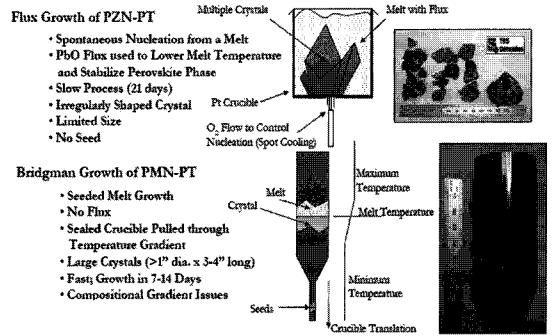


(a)

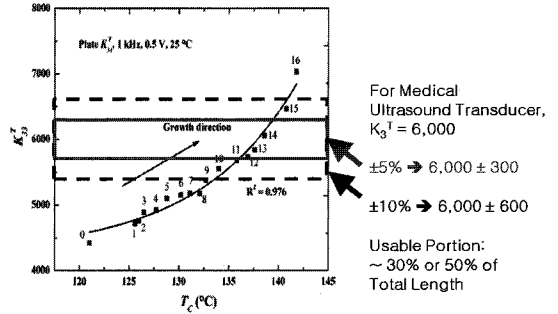


(b)

그림 6. 단결정 에너지 하베스팅 소자 연구 결과 (a) 단결정 bender, (b) 1-3 복합소재 [10].



(a)



(b)

그림 7. 기존 단결정 제조 공정 특성 및 단점 (a) Flux 법과 Bridgman 법 특성, (b) Bridgman 법에서의 조성 불균일 [11].

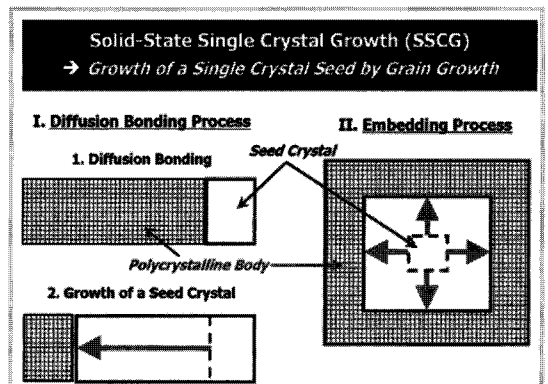


그림 8. 고상단결정 성장법의 개요.



하베스팅의 한계점으로 지적되어 온 낮은 발전량의 문제를 해결하고 본격적인 기술 상용화를 앞당길 수 있게 될 것이다 [15].

고상단결정 성장 기술을 이용하여 압전 단결정을 상용화한 (주)세라콤은 미국해군연구소 (ONR), 미국국방과학연구소 (DARPA)의 연구프로젝트에 참여하고 있으며, 미국공군과학기술국에 전투기 진동 센서용 압전 단결정 부품을 납품하는 등 세계적으로 그 기술력을 인정받고 있다 [14]. 미 공군이 기밀이 중시되는 전투기 부품의 개발 생산을 외국에 의뢰한 것은 극히 이례적인 것으로 이처럼 해외에서도 인정 받고 있는 SSCG 기술은 이제까지 이론적으로만 존재했던 이상적인 기술의 현실구현으로 평가받고 있다. (주)세라콤은 현재 한국전기연구원, 한국세라믹 기술원과 함께 기술 상용화를 위한 연구를 수행 중

표 3. SSCG 압전 단결정과 일반 압전세라믹의 에너지 하베스팅 성능 비교 [15].

	SSCG 압전 단결정 (PZT-PMN-AL)	일반 다결정 압전 세라믹 (PZT-5H-AL)	비교
압전상수(d_{31}) (pC/N)	-1,500 ~ -2,000	-250	단결정이 6~8 배 우수
전기기계 결합계수(k_{31})	0.9 이상	0.4 이하	단결정이 2 배 이상 우수
최대전력 (mw/g^2)	12.84	0.0717	단결정이 180 배 우수
최대전력밀도 ($mw/g^2 \cdot m^2$)	125.6	1.31	단결정이 95 배 우수

Dielectric and Piezoelectric Properties of (001) 70PMN-30PT Crystals Grown by SSCG Method

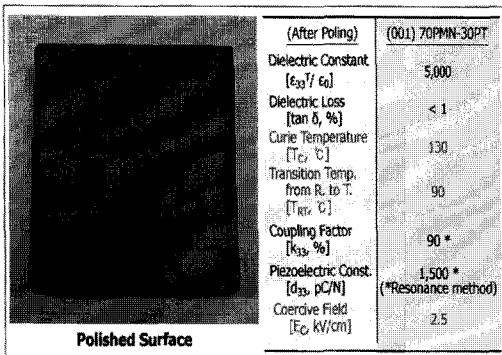


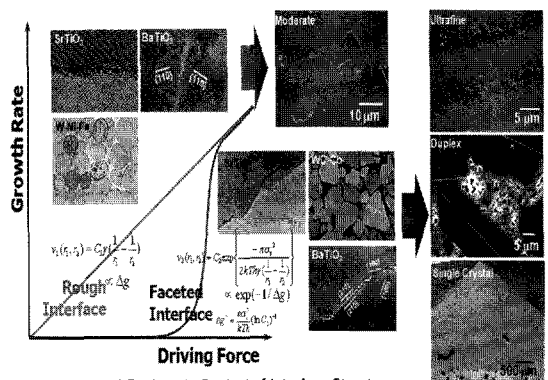
그림 9. SSCG 이용한 PMN-PT 압전 단결정 특성 (Ceracomp) [14].

이다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 기존의 압전 세라믹과 압전 단결정의 에너지 하베스팅 효율 비교와 압전 단결정에 적합한 에너지 하베스팅 부품 구조 설계 등에 집중하고 있으며, 이러한 작업이 끝나면 실제 압전 단결정을 이용한 부품을 제작하고 실제 평가 실험을 진행, 최종적으로는 실용화를 위한 사업화가 이루어질 것이다.

4. 미세구조 제어 기술

재료의 미세구조는 그 물성을 좌우하는 가장 기본적인 면서 중요한 요소이다. 새로운 특성의 차세대 소재로서 활용가치를 파악하기 위한 기계적/전기적 특성 연구는 활발하게 진행되고 있는 반면에 추후 소자 개발에 적용하기 위한 미세구조 제어에 관한 연구는 미흡한 편이다. 특히, 최근 단결정 소자 개발의 연구에 있어서 소결공정과 입자성장으로 미세구조 제어를 위한 이론적이고 학문적인 접근 방법이 요구되고 있다. 기초연구라 할 수 있는 계면의 특성과 계면이동사이의 상관관계를 모델 계에서 연구해 계면을 제어하는 일반적인 원리를 파악하고, 개발된 원리를 바탕으로 비정상입자성장을 제어하여 세라믹 단결정 개발에 적용하였다 [16]. 미세구조 제어 기술은 대부분의 소재산업 분야에 적용될 수 있는 원리를 다루는 기술이므로 특정 응용분야에 구애 받지 않고 적용될 수 있다.

미국 MIT에서는 결합화학 및 화학특성 등의 인자



Microstructural Design via Control of Interface Structure

그림 10. 계면 구조에 따른 미세구조의 변화 [16].

를 고려하여 우수한 전기적 특성을 갖는 나노계면 설계를 연구 중이다. 최근 나노수준의 Olivine $Li_{1-x}MPO_4$ ($M=Fe, Mn$)에서 전기화학적으로 유도된 상변화에 대한 연구결과와, 실리콘 표면의 나노수준의 적십성에 대한 연구결과를 발표하였다 [17]. 영국 Oxford 대학은 계면조성과 계면구조의 상호 연관성을 연구 하였다. 최근, Ge/Si 나노수준의 섬구조에서 형태학적 전이를 설명하기 위한 원자수준의 모델링과 전자산란을 이용한 비정질 재료의 나노 수준의 부피에 관한 연구 결과를 보고하였다 [18]. 일본 동경대는 소재의 계면특성과 물성의 연관관계에 대한 연구를 수행 중이다. 알루미늄 나 단결정을 특정 방향관계에 맞도록 접합한 Bicrystal을 이용하여 계면 구조와 고온 크립 특성의 상관관계에 대해 연구하였으며, 원자결합 관점에서 해석하고 있다. 산화물 표면의 원자수준의 구조를 투과전자현미경을 이용하여 직접 파악하여 발표하였다 [19].

국내에서는 KAIST를 비롯하여 서울대학교와 선문대학교 등 학계를 중심으로 재료계면에 대한 기초 연구가 진행되고 있다. KAIST에서 화학비평형상태에 의한 계면이동의 원인을 실험을 통하여 최초로 규명하였고 이론을 확립하였고, 최근에는 다양한 금속 및 세라믹 소재에서 발생하는 비정상 입자성장 및 방향성 미세구조의 형성이론을 연구하고 있으며 결과를 발표하였다 [16,20]. 고상반응 중에 발생하는 비정상입성장을 통한 단결정을 성장시키는 연구도 국내 학계를 중심으로 진행되어 왔다 [12,13]. 비정상 입자성장 현상의 근본원인 규명에 성공하여 미세구조 제어가 가능하게 되었고, 비정상입성장을 이용한 단결정 제조 기반기술은 국내 독자 기술로 선진국 수준 이상이다. 에너지하베스팅 부품화 기술 분야는 아직 시작 단계이나, 기초와 응용을 위한 기술과 인력이 확보 되어 있어, 단기간 내에 시장 선점을 비롯하여 세계 기술을 선도하는 위치에 서게 될 것으로 전망된다.

5. 결론

이상과 같이 에너지 하베스팅용 압전 단결정 기술 개발을 위하여 전 세계적으로 다양한 전공의 연

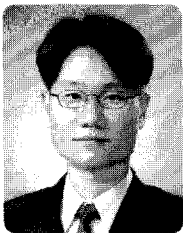
구자들이 노력하고 있다. 주위에서 버려지고 있는 진동 에너지를 수확/활용 하는 녹색기술 개발로 신기술분야를 개척하기 위해, 원천 소재기술부터 제조 공정, 정밀가공, 특성평가 및 에너지 하베스팅 소재 개발을 위한 디바이스 응용 기술, 회로 기술 등의 유기적인 협력에 의한 기술개발이 필요하다. 최근 친환경과 대체에너지가 전 세계적인 화두가 되고 있는 가운데 에너지 하베스팅 기술이 많은 관심을 모으고 있어, 압전소재 기업, 단결정제조 기업, 하베스팅 소재 기업 등 다양한 산업 분야의 기업들의 관심 또한 증가하고 있다. 국내 기업들이 이제 막 형성되기 시작한 세계 시장으로의 진입 및 시장선점이 가능하려면, 정부의 체계적인 지원으로 산학연 협동이 이루어져야 할 것이다.

압전 세라믹스는 다양한 응용처를 가진 시장으로의 파급효과가 큰 분야이다. 에너지변환 특성은 결정방위에 따라 크게 다르므로, 적극적 방위제어(단결정)를 통하여 물성향상이 가능하다. 또한, 고상 단결정 제조 기술의 이론적 바탕은 소재의 미세조직 제어 기술이며 이는 대부분의 소재 산업 분야에 적용될 수 있는 원리를 다루는 기술이므로 기술적/산업적 파급효과가 매우 크다. 국내 자체 기술로 개발된 고상 단결정 성장 기술은 기존에 압전소재를 활용하고 있는 모든 분야에서 획기적인 발전을 가져올 수 있을 뿐 아니라, 압전 에너지 하베스팅 기술 상용화를 통해 미래 유비쿼터스 센서 네트워크를 비롯한 다양한 설비에 반영구적인 에너지원을 제공할 수 있을 것으로 기대되고 있다. 비정상입성장을 이용한 단결정 제조 기반기술은 국내 독자 기술로 선진국 수준 이상이며, 우리나라의 에너지 하베스팅용 단결정 기술 분야는 아직 시작 단계이나, 기초와 응용을 위한 기술과 인력이 확보되어 있어, 멀지 않은 미래에 시장 선점을 비롯하여 세계 기술을 선도하는 위치에 서게 될 것이다. 실생활에서 활발하게 활용되기까지는 연구해야 할 과제들이 많이 남아있으나, 고상 단결정 성장 기술개발은 우리나라가 전 세계적으로 염원되고 있는 에너지 하베스팅을 구현하기 위한 원천기술을 확보함으로써 글로벌 경쟁력을 높이고 에코 에너지 선진국으로 도약할 수 있는 발판이 될 것이다.

참고 문헌

- [1] Am. Ceram. Soc. Bull., 89[1] (2010) 20
- [2] J. Am. Ceram. Soc., 93[4] (2010) 901
- [3] 세라미스트 12[4] (2009) 61
- [4] http://www.technologyreview.com/read_article.aspx?ch=specialsections&sc=tr10&id=22118
- [5] 클럽 수리야(www.club4climate.com/surya), 클럽 와트 (www.watt-rotterdam.nl)
- [6] http://www.tech-shutoko.jp/newtech/topbosyu/new_engie.pdf
- [7] <http://news.mk.co.kr/outside/view.php?year=2009&no=407612>
- [8] http://www.trstechnologies.com/Products/Single_Crystal/piezo_crystals.php
- [9] J. Mech. Des. 131 (2009) 091008
- [10] IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr., 52 (2005) 584
- [11] W.Hackenberger, ONR, PiezoCrystal Workshop, Oct.6.2004.
- [12] J. Korean. Ceram. Soc., 35[9] (1998) 905
- [13] J. Am. Ceram. Soc., 89[4] (2006)1237
- [14] <http://www.ceracomp.com/>
- [15] Appl. Phys. Lett., 93 (2008) 224102
- [16] Sintering : Densification, Grain Growth and Microstructure, Elsevier, Oxford (2004)
- [17] Annu. Rev. Mater. Res., 38 (2008) 227
- [18] Nanotechnology, 19(1) (2008) 015303
- [19] Science, 322 (2008) 5901
- [20] Acta Mater., 48(2000) 1575

저자|약력|



성 명 : 김민수

- ◆ 학 력
- 1999년 KAIST 재료공학과 공학사
- 2001년 KAIST 재료공학과 공학석사
- 2005년 KAIST 신소재공학과 공학박사

- ◆ 경 력
- 2005년 - 현재 한국전기연구원 재료응용연구본부 선임연구원



성 명 : 정순중

- ◆ 학 력
- 1989년 연세대학교 공과대학 금속공학과 공학사
- 1991년 연세대학교 대학원 금속공학과 공학 석사
- 2000년 University of Washington 재료공학과 공학박사

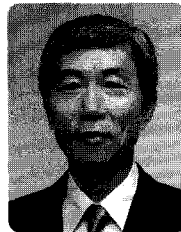
- ◆ 경 력
- 1991년 - 현재 한국전기연구원 책임연구원 재료응용연구본부
- 2004년 - 2005년 동경공대 방문연구원



성 명 : 이호용

- ◆ 학 력
- 1987년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
- 1989년 KAIST 재료공학과 공학석사
- 1993년 KAIST 재료공학과 공학박사

- ◆ 경 력
- 1993년 - 현재 선문대학교 신소재공학과 교수



성 명 : 강석중

- ◆ 학 력
- 1973년 서울대학교 공과대학 금속공학과 공학사
- 1975년 KAIST 재료공학과 공학석사
- 1980년 프랑스 Ecole Centrale de Paris 재료공학 Dr.-ing
- 1985년 프랑스 Universite de Paris VI 재료물리 Dr. D'Etat es Science Physiques

- ◆ 경 력
- 1980년 - 현재 KAIST 신소재공학과 교수
- 2005년 - 현재 나노계면연구센터 (한국연구재단 중점연구소) 소장