

MEMS 기술을 이용한 에너지 하베스팅 기술

Energy Harvesting Technology by Using MEMS

IT-에너지 융합부품소재 특집

유병곤 (B.G. Yu)

차세대 I-MEMS팀 팀장

목 차

-
- I . 서론
 - II . 에너지 하베스팅 개념 및 종류
 - III . MEMS 기술의 활용
 - IV . 마이크로 연료전지
 - V . 마이크로 히터 엔진
 - VI . Piezoelectric MPG 기술
 - VII . 결론

에너지 하베스팅 기술은 자연의 빛에너지, 인간 신체 또는 연소형 엔진으로부터의 저온 폐열에너지, 휴대용 기기 탑재/부착장치의 미세 진동에너지, 인간의 신체활동(걷거나 뛰는)으로 인한 소산에너지 등을 흡수하여 에너지 하베스팅 소자 기술을 이용하여 전기에너지로 변환, 전자 기기의 전력으로 사용하는 환경에너지 재생형 에너지원이라 할 수 있다. 유비쿼터스의 정보화 시대에는 휴대형 정보기기 등이 필수적인 기기가 될 것인데 여기에 사용되는 전력 에너지원은 소형·집적화된 기술이 필수적이다. 이때 MEMS 기술은 에너지 하베스팅 기술의 소형·집적화 기술에 크게 기여하고 극복해야 할 기술에 핵심적인 기술로 사용된다. MEMS 기술이 사용되는 대표적인 에너지 하베스팅 기술인 마이크로 연료전지, 마이크로 히터 엔진, Piezoelectric MPG 기술 등을 소개하였다.

I. 서론

21세기는 언제, 어디에서, 누구나가 정보를 자유롭게 얻가에 이용할 수 있는 유비쿼터스 정보사회가 될 것으로 예상하고 있다. 이러한 유비쿼터스 사회가 실현되기 위해서는 필연적으로 대두되고 있는 문제가 에너지 공급원의 문제다.

일례로 종래의 전화는 전화선으로부터 전원을 공급받았는데, 최근에 보급된 광화이버에서는 정전 시에 전원이 공급이 되지 않기 때문에 전화통화가 불가능하게 되어 별도의 전력 공급을 받을 수 밖에 없다. 전화뿐만 아니라 휴대전화, 노트북, PDA, 휴대게임기, MP3, 디지털카메라, 전동칫솔 등의 휴대기기 대부분의 가장 큰 과제가 에너지 공급원이다.

이러한 에너지 공급원으로 지금까지 전지가 주로 사용되어 왔고, 또한 많은 연구가 이루어지고 있다. 그런데 최근에 다양한 휴대기기 등에서 연료 교환과 충전이 불필요하거나 아주 긴 시간에 공급해주는 형태의 에너지 공급원의 필요성이 대두되고 있다. 이러한 에너지 공급원으로 최근에 많은 연구가 되고 있는 것이 주위의 환경으로부터 에너지를 수확(harvesting)하여 전력으로 변환하는 에너지 하베

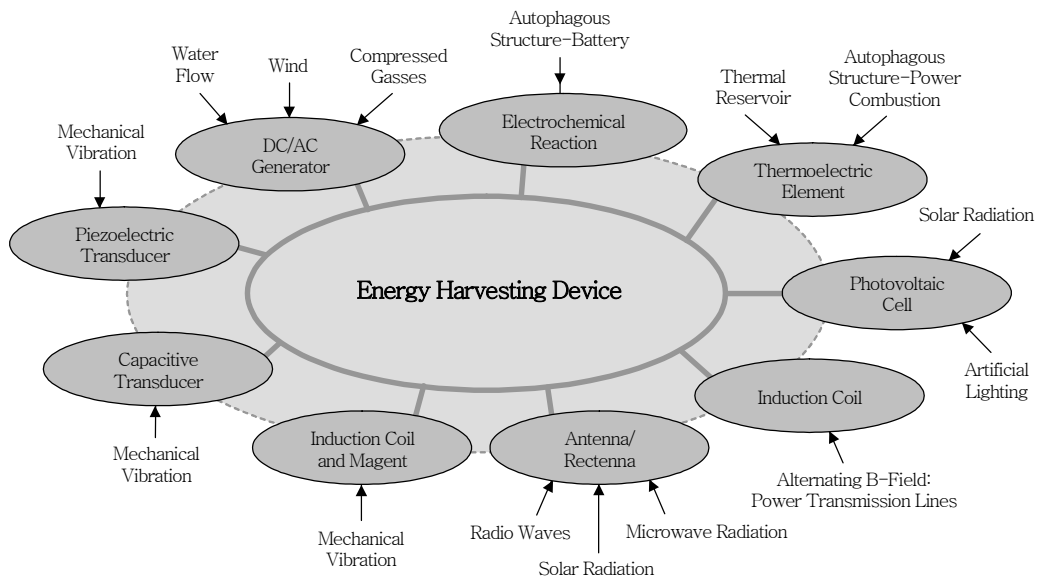
스팅(energy harvesting) 기술과 자체적으로 에너지를 생산해 내는 마이크로 동력 발생장치(MPG) 기술 등이 본격적으로 연구 개발되고 있다[1]-[3].

최근의 기술 개발에 있어서 타분야의 기술 융합이 기술의 한계를 극복하는 기술로 활용되는 예가 많이 나오고 있다. 본 고에서는 최근에 화두가 되고 있는 에너지 하베스팅 기술과 MPG 기술을 전혀 타분야라고 할 수 있는 MEMS 기술을 사용하여 다양한 문제점을 해결하고 새로운 기능을 구현하는 대표적인 기술에 대하여 그 현황과 기술적인 수준을 소개하고자 한다.

II. 에너지 하베스팅 개념 및 종류

기기 주변의 환경에너지나 태양, 바람과 같은 자연에너지 등을 수거하여 사용하는 에너지 하베스팅 기술은 “소비되거나 미활용되는 에너지를 수확(harvesting) 또는 폐이용(scavenge)하여 에너지를 재생산하는 것”으로서, 얻을 수 있는 전력 수준은 대략 $\mu W \sim mW$ 급 정도이다[4].

에너지 하베스팅 기술은 자연의 빛에너지, 인간 신체 또는 연소형 엔진으로부터의 저온 폐열에너지,



(그림 1) 에너지 하베스팅 소자 종류

휴대용 기기 탑재/부착장치의 미세 진동에너지, 인간의 신체활동(걷거나 뛰는)으로 인한 소산에너지 등을 흡수하여 Thermoelectric Element, Electrochemical Reaction, DC/AC Generator, Piezoelectric Transducer, Capacitor Transducer나 Photovoltaic Cell 등과 같은 에너지 하베스팅 소자 기술을 이용하여 전기에너지로 변환, 전자기기의 전력으로 사용하는 환경에너지 재생형 에너지원이라 할 수 있다(그림 1) 참조).

실제로 인체, 공장의 기계, 각종의 전파, 많은 물체가 발생하는 열 및 진동, RF파 등의 미세 에너지를 수확하고 폐이용하여 전력 시스템으로 사용이 가능한 것인가라고 오래 전부터 논의되고 있었는데 최근의 유비쿼터스 사회를 구현하는 프로그램이 진행되면서 이것이 현실감 있게 다가오고 있다.

물론 전력 시스템이라고 하지만 실현될 수 있는 것은 극히 저전력의 것이다(<표 1> 참조). 이러한 전력 시스템을 이용한 기기가 금방 실현되지는 않을지 모르지만 최근에 portable 의료 모니터와 흡오 토메이션 기기 등에 현실적으로 적용 가능할 것이라는 전망을 하게 된다.

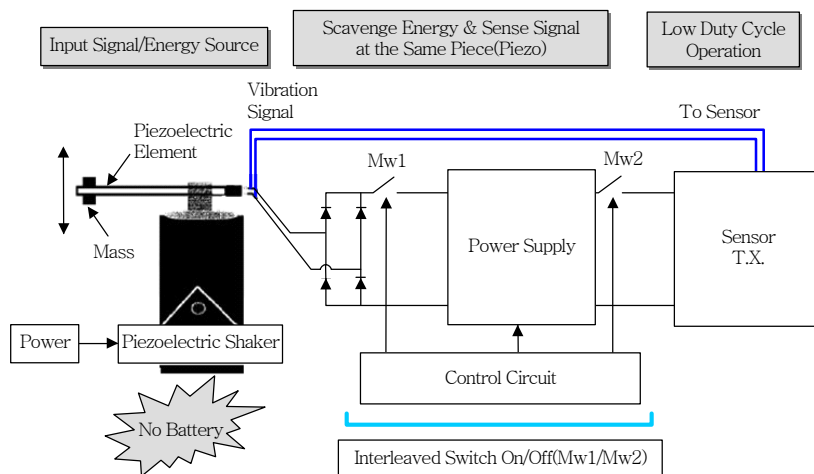
에너지 하베스트 기술의 제일목적은 전력 코스트를 절감하는 것이지만 그 외에도 이것을 통하여 새로운 응용분야의 개척도 염두에 두고 개발되고 있다. 또한 (그림 2)와 같이 전지가 불필요한 시스템이

구현되면 폐전지에 의한 중금속과 전해질액으로 인한 환경오염의 위험성을 크게 낮출 수 있어 환경부담을 줄이는 데도 크게 기여할 것으로 기대된다.

최근에 유비쿼터스 개념이 우리들의 생활에 깊이 침투하게 되면서 “유비쿼터스 사회에서는 눈에 보이지 않은 제품의 시대가 된다. 제품은 더욱욱 소형화하지만 그 기능은 더욱 고도화되고, 어디에 존재하는지는 알 수 없지만 이용하고 있는 것만은 확실하다”[5]라고 이야기하는 것에 동감이 간다. 이러한 소형화, 집적화되는 기술에는 MEMS 기술이 핵심적인 기술로 활용될 수 있다.

<표 1> 에너지 하베스팅의 에너지원 종류

에너지원	성능(에너지밀도)	특징
태양광	100 mW/cm ² (직사광) 100 μW/cm ² (사무실)	poly-Si 태양전지 효율 17%, 단결정 Si 태양전지 20%
열전소자	60 μW/cm ²	ΔT=5°C에서 ThermoLife의 출력
진동 발전소자	4 μW/cm ³ (인간동작) 800 μW/cm ³ (기계동작)	1 cm ³ 크기의 발전소자에 대한 예측치
환경 air flow	1 mW/cm ²	30 liters/min의 미소 기계 터빈에 의한 실측치
누름단추	50 μJ/N	MIT Media Lab의 3VDC에서
발압력	잠재적으로 7 W가 얻어짐(1 Hz의 보행에 70 kg에 1 cm 왜곡)	유전성 탄성 힐에서 800 mW, 압전 액추에이터에서 250~700 mW



(그림 2) Piezoelectric을 이용한 에너지 하베스팅

Ⅲ. MEMS 기술의 활용

MEMS(미소기계 전기기계 시스템)은 일반적으로 반도체미세가공을 구사하여 기계부품과 전자회로를 집적화한 마이크로 레벨의 구조를 가진 것이다. 반도체가 두뇌이고 디스플레이가 얼굴이라고 하면 MEMS 소자는 눈, 귀, 손, 발이라고 할 수 있겠다. 정보통신, 의료, 바이오, 자동차 등의 다양한 분야에서 소형, 고기능성의 고부가가치 부품의 제조를 가능하게 하는 기술로 기대되고 있다.

MEMS 기술은 종래의 제품을 획기적으로 변화시키는 가능성뿐만 아니라 지금까지 존재하지 않았던 제품의 제조를 가능하게 하는 기술이다. <표 2>에서 보는 바와 같이 기계적인 에너지를 전기적인 에너지로 변환시켜서 신호(signal)를 내는 것으로는 센서가 있고, power를 출력하는 것으로는 micro-generator가 있다. 또한 전기적인 에너지를 기계적인 에너지로 변화시키는 것으로는 마이크로 액추에이터가 있다[6].

그 외에도 소형화 등으로 응용되는 field emitter 나 microthermometer, micro flow sensor 등을 구현하는 기술이 있다. 이러한 것을 MEMS 기술을 사용하여 소형화 및 집적화를 실현함으로써 지금까지 불가능하였던 시스템을 실현할 수 있는 기술이 개발되고 있다.

우리들의 가까운 곳에서는 잉크젯 프린터, 자동차의 에어백, 프로젝션 TV 등에 MEMS 기술이 사용되고 있다.

MEMS 기술로 구현되는 제품의 분류를 보면,

<표 2> MEMS 기술에 의한 에너지 변환

Energy conversion		Technical term
Mechanical energy	Signal	Micromechanical sensor
↓		
Electrical energy	Power	Microgenerator
Electrical energy → Mechanical energy		Microactuator
Energy conversion with no mechanical energy involved		Field emitter, Microthermometer, Micro flow sensor, etc.

- 1) 센서 MEMS(압력센서, 자이로, 가속도센서)
- 2) 광 MEMS(광스위치, 광미러, 광스캐너)
- 3) 바이오·의료 MEMS(마이크로 TAS, DNA 칩)
- 4) RF-MEMS(RF 스위치, RF 필터)
- 5) Power-MEMS(마이크로 연료전지, 초소형가스터빈, MPG)
- 6) 마이크로 액추에이터(마이크로카테텔, 정밀 위치정렬장치) 등이 있다.

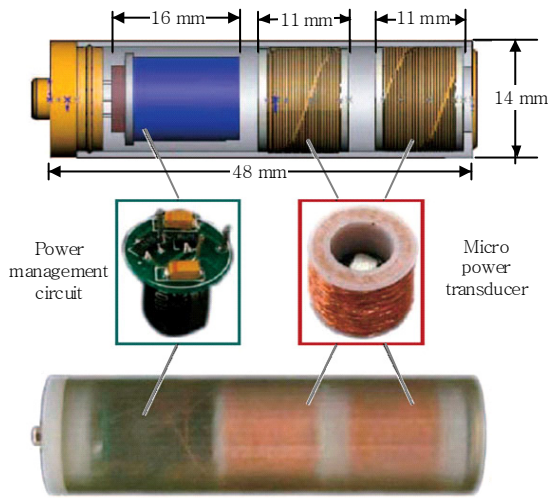
그 중에서도 최근에 Power-MEMS 기술로 마이크로 연료전지, 초소형가스터빈, MPG 등을 구현하는 기술이 활발하게 개발되고 있다.

MEMS 기술을 기반으로한 칩 초소형화 기술의 발전에 힘입어 최근 휴대용 무선 전자기기(wearable computer, 노트북 PC, 무선전화기, 무선 센서 등)는 가히 혁명적으로 변화하고 있다. 특히 대표적인 휴대용 전자기기인 노트북 PC의 경우 경량화, 소형화와 더불어 그 성능이 비약적으로 발전하여 메모리 용량과 속도, 멀티미디어 처리 및 대용량 소프트웨어를 구현할 수 있어 데스크톱 PC에 준하는 성능이 향상되었다.

그러나 휴대용 전자기기의 생명인 기동성은 그 발전 속도를 따라가지 못하고 있는데, 그 가장 큰 이유는 이러한 성능을 지원할 수 있는 Li-ion 전지와 같은 2차 전지의 성능이 불과 약 2~3배 증가하는데 그치고 있으며 앞으로도 당분간 획기적인 배터리 성능 증대를 기대하기가 어렵기 때문이다.

따라서 휴대용 전자기기의 고성능화가 기존 2차 전지로는 더 이상 진전될 수 없는 상황까지 도달하였으며, 또한 (그림 3)에 있는 바와 같이 최근 장시간 사용 가능한 휴대용 동력원을 필요로 하는 제품들이 상용화 단계로 진입함에 따라 기존 화학전지를 대체할 새로운 형태의 에너지 하베스팅 기술 및 마이크로 동력 발생장치(MPG)에 대한 요구가 크게 대두되고 있다[7].

이러한 시대적 요구에 부응하기 위해 전 세계적으로 많은 연구자들이 에너지 하베스팅 기술 및 MPG 기술의 개발을 경쟁적으로 진행하고 있는 바, 본 논문에서는 현재 개발되고 있는 이러한 기술에서



(그림 3) 홍콩대학에서 제작한 AA-size의 MPG

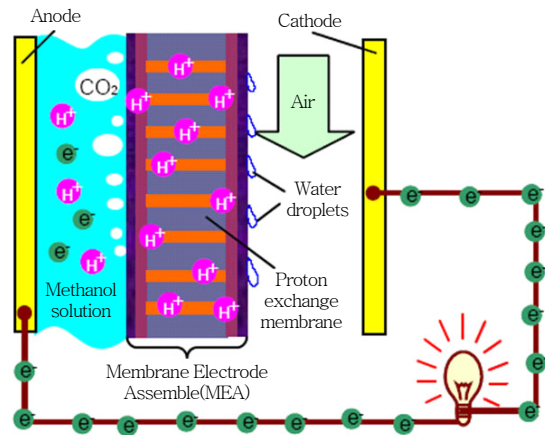
MEMS 기술이 사용되는 대표적인 몇 가지 기술에 대하여 기술적 특성 및 기술개발 현황에 대해 소개하고자 한다.

IV. 마이크로 연료전지

1. 기술 개요

연료전지 기술은 연속적으로 공급되는 연료와 산화제의 전기 화학반응에 의하여 전력을 발생시키는 원리이다. 종래의 리튬 이온전지보다도 에너지 밀도가 높고, 장시간 전력을 공급할 수 있는 특징이 있어 고성능, 고기능화가 진행되고 있는 휴대통신 단말 및 휴대전자기기용의 전원으로 주목을 받고 있다. 여기서는 MEMS 응용이 특히 기대되고 있는 마이크로 연료전지의 기술동향 및 실용화에 대한 설명을 하고자 한다.

수소를 연료로 하는 연료전지는 연료와 배기가스가 크린한 것으로 친환경 전력원으로서 전기자동차의 전력원 등으로 대규모 발전용도에 있어서 실용화를 위하여 개발경쟁이 뜨겁게 진행되고 있지만, 마이크로 연료전지에 있어서는 수소를 그대로 저장하는 것이 비효율적인 것이기 때문에 보다 고효율의 저장방법이 대안으로 제시되지 않으면 안되는 필요

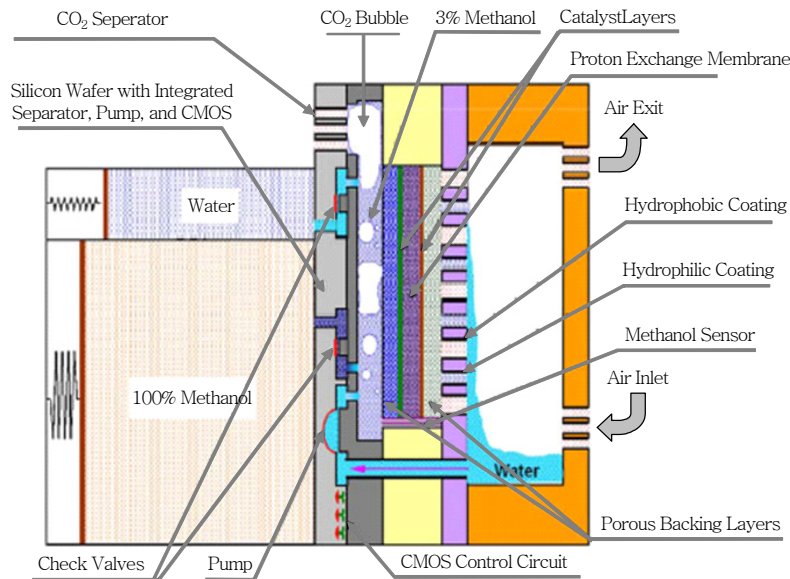


(그림 4) Direct Methanol Fuel(DMFC)

성이 대두되었다. 그래서 최근에 메탄올과 같은 액체연료로부터 수소를 발생시켜 사용할까 아니면 그 액체연료 그대로 사용하는 2가지 방법이 제안되고 있다. 전자의 대표적인 것은 연료 개질기(reformer)를 사용하는 고체분자형 연료전지(PEFC)이고, 후자는 메탄올을 연료로 하여 직접 공급하는 직접 메탄올 연료전지(DMFC) 등이 있다(그림 4) 참조.

PEFC와 DMFC의 원리를 간단하게 설명하면, PEFC는 수소를 원료로 사용하기 때문에 수소원으로 사용하는 메탄올, 에탄올, 부탄올 등을 수소로 발생시키는 개질기가 필요하다. 그러나 수소를 사용하므로 효율은 대단히 높다. DMFC는 연료를 메탄올을 직접 사용하므로 개질기가 필요 없다. 또한 메탄올이 산소와 반응하여 수소가 6개 생기면서 전자 6개를 생성하게 된다. 이와 같이 메탄올 연료로서도 굉장히 매력적인 면이 있음을 알 수 있다. 그러나 이 양극 반응은 복잡한 과정을 거치므로 수소를 원료로 하는 경우에 비하여 반응속도가 느리게 된다. 그러므로 수소를 원료로 하는 PEFC보다도 DMFC는 출력이 낮아지는 단점을 가지고 있다[8].

수소를 직접 양극에 공급하는 PEFC는 높은 출력을 얻을 수 있지만 수소를 공급하는 시스템이 수반이 되어야 하므로 단순한 소형화는 에너지 밀도의 현저한 저하를 가져오므로 소형화되는 PEFC에서 높은 에너지 밀도를 확보하기 위해서는 액체연료로부터 수소를 발생시키는 연료 개질기의 소형화가



(그림 5) MEMS 기술을 적용한 연료전지(DMFC)

불가피하다. 연료 변환시스템은 굉장히 복잡하게 이루어져 있는데, 변환반응을 위한 히터, 단열구조, 열교환, 가습 등의 부품의 소형·집적화에 다양한 MEMS 기술이 적용되어 개발되고 있다[9].

한편, 메탄올을 직접 양극에 공급하는 DMFC는 연료 개질기가 불필요하여 소형화에는 쉬운 시스템이라고 할 수 있는데 PEFC에 비하여 출력이 낮기 때문에 고에너지 밀도화를 실현하기 위해서는 메탄올을 고농도로 저장하여 희석 공급하는 시스템, 즉 음극에서 발생한 물을 회수하여 재이용하는 시스템이 필요한 것으로 생각된다. 그러나 종래의 펌프와 밸브, 메탄올의 농도 센서, 공기 부로어 등의 소형화에는 한계가 있다. 고성능·저소비전력의 보조기기를 소형·집적화하는 기술로는 MEMS 기술에 기대가 모아지고 있다(그림 5) 참조).

2. 기술개발 동향

일본의 도시바, 카시오, NEC, 미국의 DARPA, Motorola, Millennium Cell, MIT, Illinois 대학, UCLA, 한국의 삼성전자 등에서 노트북, 휴대폰, PDA, MP3 player, Video player 등 휴대형 무선전자기기 등의 동력원으로 활발하게 개발중에 있다.

일본의 도시바는 DMFC의 연구결과를 발표하고 있는데 휴대단말용으로 12~20 W급의 연구성과를 얻고 있다. 그 구성은 연료 카트리지에 100%의 메탄올을 저장하여 셀에 발생하는 물을 회수하여 연료의 희석에 재사용하는 시스템이다. 캐소드 촉매로 고밀도 지지가능한 카본나노 화이버와 PtFeN 촉매를 또 메탄올 크로스오버를 제어하는 기술로 전해질막 표면의 개선과 구아니딘 첨가기술을 개발하였다. 카시오는 17×25 mm의 소형화된 메탄올 수소 개질기와 같은 사이즈의 일산화탄소의 선택산화반응기를 각각 실리콘 기판상에 제작하여 동-산화 아연계의 수소변환 촉매를 반응온도 280°C에서 동작시켜도 98% 이상의 메탄올 변환율을 달성하고 있다[10].

특히 미국은 DARPA 중심으로 1990년대 중반부터 출력 20 W, 에너지 밀도 3,000 Wh/kg의 Palm-top형 연료전지를 개발하고 있다[9].

Motorola는 seamless mobility를 비전으로 가지고, 2010년에는 휴대전화기가 항상 대용량의 정보를 액세스하는 상태로 되므로 10,500 Whr/Y의 전력 사용량이 될 것이라는 전망을 하고 있어 연료전지의 사용은 필연적일 것이라고 보고 있다. 막 기술은 single wall carbon nanotube를 사용하여 Pt 촉매



(그림 6) 삼성 노트북 PC용 연료전지와 휴대폰용 연료전지

를 감소시켜서 성능향상을 꾀하고 있다. 또한 BASF와 공동으로 소형의 메탄올 개질기를 고안하여 30%의 변환율과 90% CO₂ 선택률의 데이터를 얻고 있다[11].

삼성SDI는 2005년에 세계 최고의 200 Wh/L 에너지 밀도를 가진 높이 5.3 cm의 초슬림 디자인을 가진 연료전지를 발표한 후로, 최근에는 50~60 mW/cm²의 출력을 확보하고 있다(그림 6) 참조). 연료전지의 촉매에 Fe 또는 Co를 중심으로 한 유기 중합체 이용을 검토하였다. 유기 중합체를 사용하는 것에 의하여 Fe와 Co의 응집을 방지하고 반응성을 높이려는 시도인데 유기체는 테트라 패닐 폴리피린을 사용하였다. 최근에 DMFC의 전극촉매는 장시간 사용하면 열화되어 현상적으로는 Pt 크로스버, Ru 크로스버로서 관측된다. Ru 크로스버는 아노드에서 생긴 RuO₃가 카소드로 수송되어 발생된 것이고, Pt 크로스버는 아노드에서 PtOH⁻가 전해질 막 중에 석출되어 생기는 것으로 보고되고 있다[12].

연료전지는 수 μW부터 수 kW급 출력의 마이크로 동력원으로 사용이 가능하나 2차 전지인 Li-ion 전지의 에너지 밀도 160 Wh/kg, 출력 밀도 600 W/kg에 비해 연료전지의 에너지 밀도는 최대 약 800 Wh/kg, 출력 밀도는 최대 약 50 W/kg 정도로 에너지 밀도는 매우 높으나 출력 밀도가 매우 낮은 수준이다.

따라서 수십 mW급 이하의 저출력 시스템에서는 기존 '2차전지에 비해 연료전지 주변기기의 크기가 커져서 사용하기가 어렵고, 또한 연료전지는 수십 W급의 저출력, 고에너지 밀도를 요구하는 휴대형 무선전자기기(야시경, GPS, digital compass, 열상 장비 및 생화학전용 센서시스템 등)의 동력원으로는

적합하나, 최근 민수용 및 군수용으로 개발이 급속히 이루어지고 있는 소형 로봇(Aibo 등), 휴머노이드 로봇(Asimo, Hubo 등), MAV, 동력 전투복(powered suit)과 같은 고출력, 고에너지 밀도를 요구하는 장비의 동력원으로는 적합하지 않다는 것을 알 수 있다. 따라서 USN, RFID tag 등 mW 이하의 극소형 또는 초소형 무선전자기기의 동력원으로는 환경에너지 재생형 MPG가 그리고 장시간 사용을 요구하는 고출력 동력원으로는 출력밀도와 에너지 밀도가 각각 700 W/kg, 1,000 Wh/kg 이상인 마이크로 IC 엔진, 마이크로 가스터빈이 유력하다는 것을 알 수 있다[13].

이러한 이유로 미국, 일본, 유럽 등의 선진국에서는 최근 급속히 기술 진보가 이루어지고 있는 MEMS 기술을 응용하여 마이크로 가스터빈, 마이크로 IC 엔진과 같은 연소형 MPG(또는 Micro Heat Engine)와 스마트 재료를 이용한 환경에너지 재생형 MPG의 연구개발이 활발하게 이루어지고 있다.

V. 마이크로 히터 엔진

1. 기술 개요

MEMS 기술을 이용한 마이크로 히터 엔진(Microscale Heat Engines)은 미국을 중심으로 선진국에서 활발하게 연구 개발되고 있다. 그 주요 목적은 엔진과 발전기를 소형집적화 하는 것에 의하여 소형 고출력 전원을 실현하는 것으로 알고 있다. 마이크로 히터 엔진의 연료에 사용되는 수소 또는 탄화수소계 연료(프로판, 메탄, 가솔린 등)의 에너지 밀도는 최신의 리튬 이온 전지에 비하여 약 50~100배 정도로 높다. 그러므로 화학에너지로부터 전기에너지로의 변환효율이 ~10%로 가정해도 마이크로 히터 엔진을 개발하게 되면 리튬 이온전지의 1/5에서 1/10의 크기로 소형 고출력 전원이 실현되게 된다.

한편, 각종 응용제품에 요구되는 전력 레벨은 마이크로 센서 액추에이터 구동에서는 약 10 μW이고,

wireless communication에서는 약 100 mW이다. 그러한 전력 레벨을 마이크로 히터 엔진이 기본으로 하여 소형 전원이 달성되면 엔진, 발전기, 제어 IC 등이 집적 실장화된 자립형 마이크로 센서 액추에이터 시스템의 실현도 꿈은 아닐 것이다.

그러나 소형 고효율의 엔진을 구현함에 있어서는 몇 가지의 기술적인 문제점이 있다. 피스톤, 로터(rotor)와 실린더 케이스의 간격에서 작동 가스의 리-크를 막아내기가 어려워, 효율과 압축비등이 저하되는 문제점이 생기게 된다. 이러한 소형 기계적 구조를 제작함에 있어서 MEMS 기술은 획기적인 힘을 발휘할 수 있다.

2. 기술개발 동향

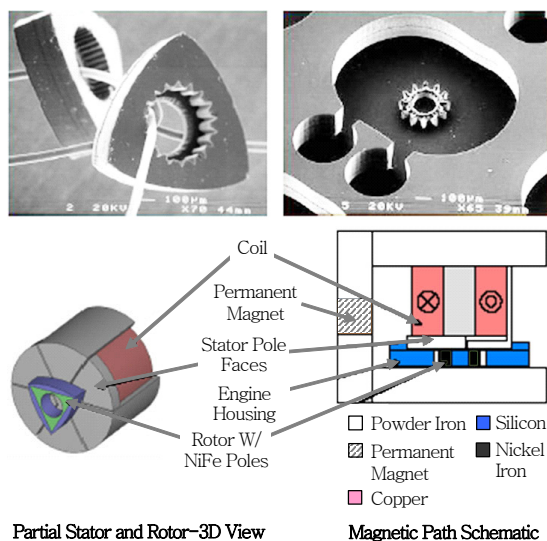
UC Berkeley의 MEMS Rotary Engine은 실리콘의 deep 식각 공정을 기본으로 하는 MEMS Rotary 엔진과 발전 시스템을 제작하고 있다[14].

MEMS Rotary 엔진에 의한 발전 시스템은 엔진 요소인 실리콘제의 토로코이드 로-터-하우징 및 연료기화기와 실리콘 이외의 소재를 이용한 외부 발전 기로부터 구성된다. 제작된 엔진의 시작품의 예를 (그림 7)에 보여주었다. 발표된 엔진의 대표적인 제원은 로-터-경 $D=1\text{ mm}$, 압축비 $\varepsilon=8.2$, 행정용량

$VH=0.08\text{ mm}^3$, 정격 회전수 $n=34,000\text{ rpm}$ 으로 출력은 $W=100\text{ mW}$ 의 4 스토르크의 사이클 엔진이다. 연료는 부탄 등의 탄화수소계 연료를 사용하고 있다. MEMS demo 엔진에서 발표된 엔진의 출력 제원과 엔트로피 변화를 가정한 사이클 평균 압력 p 로부터 대략적인 계산을 해보면 $W=pVHn/3\sim 240\text{ mW}$ 정도가 된다. 수 100 mW의 출력이 실현되는 것을 볼 수 있다.

기술적으로 도전해야 할 과제는 1) 넓은 범위의 온도에서 사용이 가능한 구조 재료의 선정인데, 세라믹계 재료에 메탈 재료를 단열 코팅하는 것으로 채용되고 있는데 MEMS 엔진에서도 그 유효성이 기대된다. 2) 로-터-와 하우징간의 간격에 있어서 동작 가스의 리-크 문제는 mechanical seal을 일괄하여 가공한다. 3) 미소공간에서의 연료의 기화와 착화연소를 지탱할 기구의 개발은 실리콘과 유리의 접합에 의하여 캐피러리(capillary) 구조를 가진 기화기, spark plugs와 glow plugs를 제작한다. 4) 엔진의 외부 부착용 발전기의 개발은 trochoid rotor의 중심부에 자성체가 있는 파마로이를 전극 철심으로 한다. 5) 포토 리소그래피를 근본으로 하는 프래너 구조로 제한된 엔진 구조의 설계 등이다.

Honywell 연구소는 미네소타 대학과 공동으로 MEMS free piston nook 엔진을 개발중에 있다. 엔진은 마주보는 2개의 피스톤에 의하여 끼워져 있는 연소실을 가진 구조이다. 피스톤은 연소실에 의한 압력과 공기탄력의 복원력에 의하여 복원운동을 하는 동시에 연료와 연료가스의 소비기에도 사용된다. 엔진의 외부에 발전기가 붙어 있다. 피스톤의 왕복 운동에 의하여 $5\sim 10\text{ W/cm}^3$ 의 발전을 목표로 하고 있다[15].



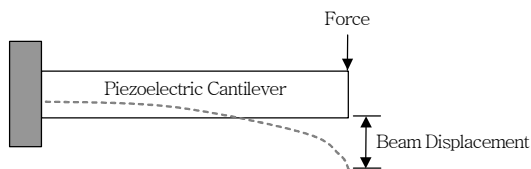
(그림 7) MEMS로 제작된 로터 및 엔진의 모식도

VI. Piezoelectric MPG 기술

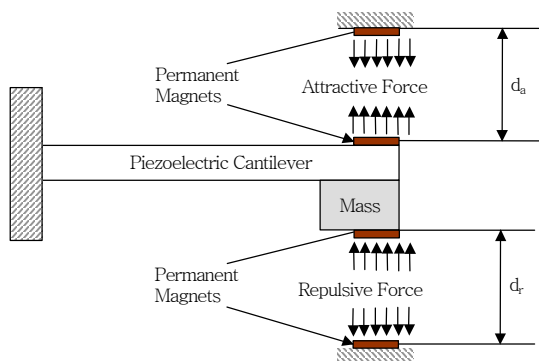
1. PMPG 기술 개요

MPG(Piezoelectric Micro Power Generator) 기술은 외부로부터 화석 연료나 바이오 연료를 공급

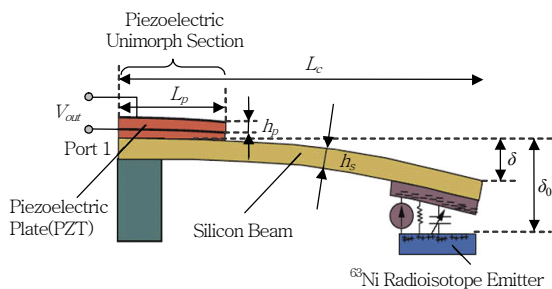
받아 전기에너지로 변환하는 것이 일반적인 것인데, 여기서는 압전효과를 이용한 마이크로 동력변환 장치에 대하여 설명을 하고자 한다. 압전재료의 특성은 재료가 외부에서의 힘 또는 스트레스를 받아 휘거나 구부러지면 전기에너지가 발생하는 것인데 (그림 8) 참조, 여기서 외부의 스트레스를 주는 방법은 주로 압전재료를 박막의 cantilever를 제작한 다음에 끝에다가 mass를 만든 다음 상하에 (그림 9)와 같이 영구자석을 두어 vibration을 발생하거나 (그림 10)과 같이 방사성 물질을 이용하여 압전 박막 cantilever가 vibration을 일으키도록 한다. 또한 외부의 유체 또는 공기의 흐름을 이용한 연구도 있다.



(그림 8) 압전효과에 의한 기전력 발생 원리



(그림 9) 영구자석을 이용한 PMPG



(그림 10) 방사성물질을 이용한 PMPG

압전 박막의 bending stress에 의하여 생기는 기전력은

$$V = \frac{-d_{31}t_b}{\epsilon} \sigma$$

V(t): voltage,

d_{31} : piezoelectric strain coefficient

ϵ : dielectric constant

t_b : thickness of the piezoelectric beam

$\sigma(t)$: bending stress

으로 나타낼 수 있다.

이때 압전 박막이 공명이 잘 일어나서 신뢰성 있는 구조체를 만드는 것이 대단히 중요하다. MEMS 기술은 이러한 정교한 구조체를 제조하는데 핵심 기술로 활용이 된다.

2. PMPG 기술개발 동향

스티븐스대학(Stevens Institute of Technology)에서 발표한 특성은 22~32 Hz에서 240~280 μ W의 출력을 얻고 있다. 이 그룹은 원통형의 영구자석을 시뮬레이션을 통하여 가장 적정의 전자력을 찾아서 사용하고 있다(그림 9) 참조[16].

외부 소스의 방사성 물질을 사용한 연구는 코넬대학(Cornell University)에서 발표를 하고 있다. (그림 10)과 같이 ^{63}Ni 방사성동위원소를 사용하여 35 Hz에서 최대 35 μ W의 출력 전력을 얻고 있는 것을 볼 수 있다. UC Berkeley에서는 120 Hz, 5 m/s^2 의 진동에너지로 800 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$ 의 전기에너지 변환능력을 보이고 있고, 최근에는 강유전체 박막을 sol-gel법에 의해 제작하여 우수한 진동에너지를 얻고 있는 것을 볼 수 있다[17].

압전재료에 응력을 가하기 위하여 바람을 이용한 개념은 새로운 접근 방식인데, 텍사스대학이 연구하여 발표한 것을 보면 풍속과 전력 출력관계가 선형적으로 증가하는 것을 볼 수 있었고, 최대 출력 전력은 6.7 kohm의 부하저항에 의하여 10 mph의 풍속에서 7.5 mW의 큰 것을 얻을 수 있음을 설계를 통하여 보여주고 있다[18].

VII. 결론

MEMS 기술이 사용되는 대표적인 에너지 하베스터 기술을 소개하였다. 마이크로 연료전지, 마이크로 히터 엔진, Piezoelectric MPG 기술 등을 소개하였는데 지금의 에너지 하베스터 기술은 아직 prototype 수준의 것이 대부분이다. MEMS 기술은 소형화·집적화에 크게 기여하고 있어 지금까지 구현하기 어렵고 기술적인 한계를 극복하여 장시간 사용이 가능한 에너지원이 실현될 것이다. 이러한 기술을 power MEMS라는 국제 워크숍이 개최되어 power generation과 energy conversion 응용에 대한 연구성과가 발표가 되고 있어, 향후에 기술의 발달로 실용화 용도가 출현할 것은 자명한 일이다. 이러한 실용화 기술이 개발되면 새로운 에너지 분야의 시장 창출을 할 수 있을 것이다.

● 용어해설 ●

에너지 하베스팅 기술: 자연의 빛에너지, 인간의 신체 활동(걸거나 뛰는)으로 인한 소산에너지, 연소형 엔진으로부터의 저온 폐열에너지, 휴대용 기기 탑재/부착 장치의 미세 진동에너지 등을 흡수하여 에너지 하베스팅 소자를 이용하여 전기에너지로 변환, 전자 기기의 전력으로 사용하는 환경 재생형 에너지원 생성 기술.

MEMS(Micro Electro Mechanical System, 미소기계 전기기계 시스템): 반도체 미세 가공 기술을 구사하여 기어, 펌프 피스톤, 밸브 등의 기계적인 구조체를 마이크로 레벨의 미세 구조로 제작하는 기술로서 최근에는 구동 전자회로를 집적화하는 I-MEMS(Integrated MEMS)의 기술도 개발되고 있음.

약어 정리

DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency
DMFC	Direct Methanol Fuel Cell
GPS	Global Positioning System
MAV	Micro Air Vehicle
MEMS	Micro Electro Mechanical Systems
MPG	Micro Power Generation

PEFC	Polymer Electrolyte Fuel Cell
USN	Ubiquitous Sensor Network

참고 문헌

- [1] 이영기, 이성규, 박강호, 강만구, 김종대, “에너지 하베스트 기술과 IT용 디바이스 응용,” 주간기술동향, 통권 1343호, 2008. 4. 23., pp.30-36.
- [2] 최상규, 박중호, 손영수, “휴대형 마이크로 동력원의 기술 현황,” 기계와 재료(특집: 초소형 발전 및 에너지 회생 기술), 2007. 10., pp.6-19.
- [3] 박승창, 조일식, “전기에너지 수확 기술의 개발동향 분석,” 주간기술동향, 통권 1339호, 2008. 3. 26., pp.22-34.
- [4] Joseph A. Paradiso and Thad Starner, “Energy Scavenging for Mobile and Wireless Electronics,” *Pervasive Computing*, Jan.-Mar. 2005, pp.18-27.
- [5] 차세대 MEMS 신기술보고서, 신기능소재연구개발협회, 2005.
- [6] S. Basrour et al., “Micro and Nano Systems,” TIMA-Annual Report, 2007, pp.7-26.
- [7] Steve C.J. Yuen et al., “An AA-Sized Vibration Based Microgenerator for Wireless Sensors,” *Pervasive Computing*, Jan.-Mar. 2007, pp.64-72.
- [8] De-Sheng Meng et al., “A Distributed Gas Breather for Micro-DMFC,” *Proc. of the IEEE MEMS 2003*, Kyoto, Japan, 2003, pp.534-537.
- [9] Shi-Chune Yao et al., “MEMS-based Micro-scale DMFC Development,” *Science Direct Energy*, Vol.31, 2006, pp.636-649.
- [10] <http://kagakukan.toshiba.co.jp/dna/explore/en/no4/index.html>
- [11] Oleg Ilinich et al., “A New Pb-Based Catalyst for Methanol Stream Reforming in a Miniature Fuel Cell Power Source,” *Platinum Metal Rev.*, 2008, Vol.52, No.3, pp.134-143.
- [12] <http://www.samsungsdi.co.kr/contents/kr/main.jsp>
- [13] <http://aeroastro.t.u-tokyo.ac.jp/research/micro/mgt.htm>
- [14] A. Carlos Fernandez-Pello et al., “MEMS Rotary Engine Power System,” *IEE J. Trans. SM, Special Issue Review*, Vol.123-E, No.9, 2003, pp.326-330.
- [15] <http://www.me.umn.edu/~haich/engine/index.html>
- [16] Vinod R Challa et al., “A Vibration Energy Harvesting Device with Bidirectional RF Tunability,” *Smart Mater. Struct.*, Vol.17, 2008, pp.1-10.

[17] Amit Lal et al., "Pervasive Power: A Radioisotope-Powered Piezoelectric Generator," *Pervasive Computing*, Jan.-Mar. 2005, pp.53-61.

[18] Shashank Priya, "Modeling of Electric Energy Harvesting Using Piezoelectric Windmill," *Applied Physics Letters*, Vol.87, Issue 18, 2005, pp.101-113.