특집 Micro Power

# 풍부하고 돈 안드는 클린 에너지 - Energy Harvesting

최창수(LS산전 통신연구단 단장)

## 1. 서 론

인류는 늘 혁신이라는 변곡점을 통하여 문명의 발전을 영위하여 왔다. 산업혁명 때 방직기의 효율을 획기적으로 높인 것이 상상하지 못할 결론으로 발전된 것은 좋은 예일 것이다. 또한 통신 기술의 발전으로 정보혁명이 일어나 이제 세계는 5분 안에 누가 어디서 무엇을 개발하고 있는지 다 알 수 있는 Web1.0의 시대가 되었을뿐만 아니라 이를 넘어 네트워크 사용자가 참여하는 Web 2.0(Social Web)이라는 새로운 문화까지 만들어 내었다. 고정형 네트워크는 물론 이동형의 대표로써 내 손 안에 들어 있는 스마트 폰을 통해서는 갑작스런 폭우로 졸지에 침수된 시내의 도로도, 코미디보다 더 재미있는 어느 정치인들의 말 싸움도 다 들어있다. 정보의 유통에서 소비자이기만 하였던 네트워크 사용자는 이제 더 이상 단순한 소비자가 아니며 더 더욱 고정된 장소에서만 통신망에 참여하는 것도 아니다. 더 돌아다니고, 더 빨라지고, 떠돕아지고, 더 속이 투명하게 보이는 현재의 통신 세계는 기존의 에너지 인프라 위에 형성되어 있다. 기존의 에너지 인프라는 현재의 통신 환경의 에너지 요구를 적절히 지원할까?

인류의 생활과 산업 생산의 기본 요소인 에너지는 화석 연료를 기반으로 발전하여 왔다. 우리가 매일 사용하는 의, 식, 주의 전 영역에 걸쳐 화석연료로부터 온 재료 또는 에너지가 사용되어 있으며, 이 중요하고도 치명적인 화석연료의 확보, 유가의 변동 등과 관련되어 전 세계가 들 끓는 것도 더 이상은 뉴스도 되지 못할 것 같다. 무한 경쟁의 글로벌 환경에서 무분별한 에너지의 사용 및 $CO_2$ 가스의 양산은 인류 전체를 위협하는 부메랑이 될 것이다. 과연 이러한 다가 올 위기를 극복 할 기술은 없을까? 새로운 혁신을 통하여 인류의 안전하고 풍요로운 미래를 보장 할 일은 무엇일까?

이러한 명제의 기술적인 접근 방법으로 현재 세계적으로 대두되고 있는 것이 그린 기술이다. 그린 기술은 기존에 사용되고 있는 모든 에너지의 효율적인 개선과 풍력, 태양력, 연료전지 등의 신 재생 에너지의 활용을 통하여 친환경적이면서 효율적인 에너지의 재료, 생산, 분배, 사용, 유지관리에 관련된 제반 기술을 통칭하여 말한다. 스마트 그리드, $CO_2$ 감축 등의 기술과 함께 최근 주목을 받고 있는 기술이 Energy Harvesting 기술이다. Web 2.0의 시대를 넘어 다음으로 나타날 Web을 기기간의 통신, Sensor Network과 같은 소규모 저전력 컴퓨팅 장치의 분산을 고려한다면, 이와 관련된 에너지의 문제는 반드시

표 1. 에너지 원에 따른 에너지 밀도

| | | Power Density ($\mu W/cm^3$) 1 Year Lifetime | Power Density ($\mu W/cm^3$) 10 Year Lifetime | Source of Information |
|---|---|---|---|---|
| Scavenged Power Sources | Solar (Outdoors) | 15,000 – direct sun<br>150 – cloudy day | 15,000 – direct sun<br>150 – cloudy day | Commonly Available |
| | Solar (Indoors) | 6 – office desk | 6 – office desk | Roundy [86] |
| | Vibrations | 200 | 200 | Roundy et al. [99] |
| | Acoustic Noise | 0.003 @ 75 dB<br>0.96 @ 100 dB | 0.003 @ 75 dB<br>0.96 @ 100 dB | Theory |
| | Daily Temp. Variation | 10 | 10 | Theory |
| | Temperature Gradient | 15 @ 10°C gradient | 15 @ 10°C gradient | Stordeur and Stark 1997 [90] |
| | Shoe Inserts | 330 | 330 | Starner 1996 [95] |
| Energy Reservoirs | Batteries (nonrecharge Lithium) | 45 | 3.5 | Commonly Available |
| | Batteries (rechargeable Lithium) | 7 | 0 | Commonly Available |
| | Fuel Cells (methanol) | 280 | 28 | Commonly Available |
| | Nuclear Isotopes (Uranium) | $6 \times 10^6$ | $6 \times 10^5$ | Commonly Available |

해결되어야 하는 과제이다. 기존의 방법으로는 배터리를 활용하여 분산된 노드에 에너지를 공급하는 방식이었으나 이 방식은 배터리 수명의 문제와 배터리의 교체 등 여러 가지 문제점을 가지고 있다. 따라서 배터리의 교체 없이도 오랫동안 동작할 수 있는 방법을 고려한 한가지 방법이 Energy Harvesting이다.

이번 특집기고에서는 미래의 통신망 발전에 반드시 필요한 에너지의 문제를 해결하기 위한 한 가지 방법으로 우리 주변에 에너지를 획득하고 저장하여 사용하는 방법인 Energy Harvesting에 대해 알아본다.

## 2. Energy Harvesting의 개요

Energy harvesting(Power harvesting 또는 energy scavenging으로도 알려진)은 에너지를 획득하고 저장하는 처리과정 전반을 이야기 하는 것이다. 에너지 하베스팅이 주목받기 시작한 것은 센서 네트워크 등의 이동형 기기 활용이 확대되면서 이들 센서노드의 전원으로 밧데리를 사용하는 것이 밧데리의 사용시간, 교체주기 등의 문제로 매우 불합리하므로, 주변의 에너지를 직접 획득하여 사용하는 방법이 필요하다는 요구가 생기면서부터이다. 우리가 자연으로부터 획득할 수 있는 에너지의 종류로는 태양광, 풍력, 수력, 조력, 온도차, 진동, 자계, 지진파등이 있다. 표 1에는 각각의 주변 에너지 원들이 가지고 있는 에너지 밀도를 분석해 놓았다.

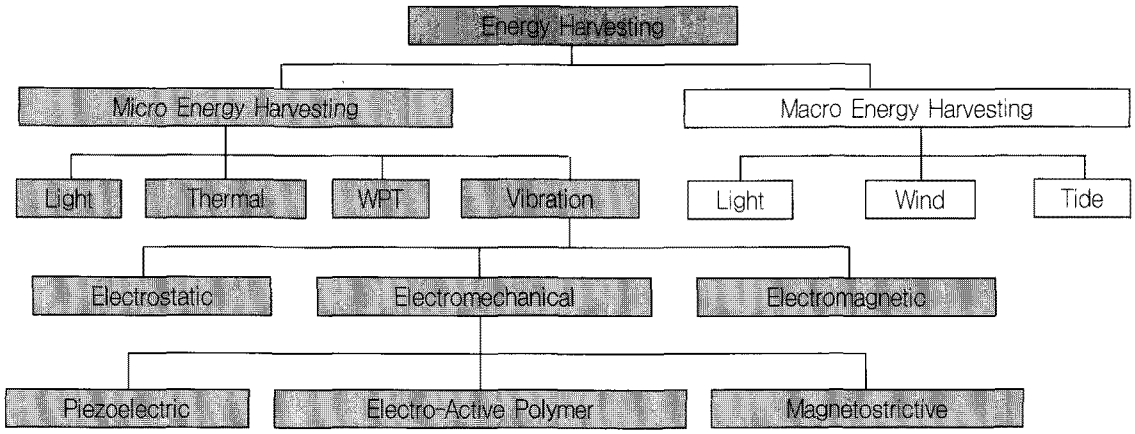
## 3. Energy Harvesting분류

에너지 하베스팅의 방법으로는 Macro와 Micro로 분류되는 다음 표를 참조해 볼 수 있다.

상기한 표에서 Macro한 에너지 하베스팅 방법은 주로 신재생 에너지 분야의 연구 영역이다. 에너지 하베스팅에서 관심이 있는 부분은 Micro한 영역에서의 에너지 하베스팅이다.

빛 에너지는 현재 가장 발전된 분야 중에 하나이며, Macro한 분야에서는 태양광 발전 사업 등의 정부 지원 사업 및 산업계 독자적인 시장 개척에 따라 매우 활성화되어 있다. 태양광의 장점은 표 1에 나타낸 것처럼 에너지 밀도가 매우 높아서 풍부한 전원으로 사용될 수 있다는데 있다. 하지만 태양광은 음영지역이나 밤에는 사용할 수 없다는 단점도 가지고 있다. 현재 태양광 발전에 사용되는 모듈들은 대개는 실리콘 결정계의 모듈을 사용하여 20[%] 정도의 효율을 나

**표 2. 에너지 하베스팅의 분류**




* WPT : Wireless Power Transmission

타내고 있으며, 박막형도 실용화 단계에 와 있다.

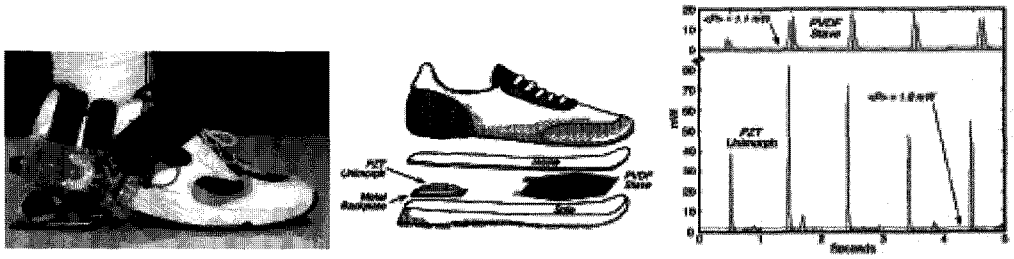
온도 에너지는 열전 효과를 이용하여 발전하는 원리를 활용하는 방식으로, 열전 효과는 1821년 Seebeck효과로 불리는 두 개의 서로 다른 도체 사이의 온도 차가 전압을 만드는 물리적 현상을 이용한 것이다. 두 개의 도체 사이에 온도 차가 발생하면 열이 이동하게 되고 이것이 충전 전하를 이동하게 하고 이것이 두 도체간에 전압 차를 발생하는 것이다. Peltier는 두 도체 사이의 전류 흐름에 따라 히터로도 냉각기로도 사용할 수 있다는 펠티어 효과를 발견해 내기도 하였다. 현재에는 열전쌍을 만들기 위하여 P와 N으로 도핑된 Bismuth-telluride 반도체를 접합하여 사용한다. Seiko 시계에서는 인체의 열 에너지로 작동하는 시계를 연구하였고, Themo Life Energy 사에서는 5도차의 인체 접촉 시 3[volt]에서 10[uA] 정도의 전력을 발생하는 센서를 개발하기도 하였다. 열전 효과는 기구물 부분이 없어 매우 장기간 사용할 수 있는 장점이 있으며, 한 번 설치되면 교환이 필요 없고, 전류의 방향에 따라 히팅도 쿨링도 할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 한 가지 단점은 에너지 변환 효율이 10[%] 정도로 매우 낮아서 에너지 변환 효율을 높일 수 있는 열전 소자의 개발이 필요하다는 점이다.

이에 비해 진동에너지는 전력 밀도가 태양광에 비해서는 다소 적지만 어디서나 사용하기 좋은 에너지원이며, 에너지 발생 장치를 매우 소규모로 만들 수 있다는 장점 때문에 연구가 활발한 분야이다. 진동 에너지를 전기 에너지로 변환하는 방법으로는 표에 나타낸 세 가지 방법이 있다.

## 3.1 Piezoelectric energy harvesting

Piezo 효과를 이용하는 방법이 가장 활발히 연구되고 발전된 방법 중의 하나이다. 피에조 물질은 Li, Ti, Pb, Ga 등과 N, O 등의 분자를 단결정 세라믹으로 만든 것으로, 결정 구조에 힘이 가해지면 전압이 발생하는 물질이다. 피에조 물질은 매우 높은 전압을 아주 적은 힘으로도 발생하여 에너지 변환 효율이 상대적으로 매우 높은 것으로 알려져 있다. 피에조 물질의 종류로는 사용된 재료에 따라 PZT, PVDF, PMN-PT 등으로 나눌 수 있으며 이 재료들은 밀리와트 급의 전력을 생산해 낼 수 있어서, 모바일 기기의 전원 용도로 사용될 수 있을 정도이다.

DARPA에서는 인간의 운동으로부터 연속적으로



에너지를 얻는 연구를 신발 뒷축에 압전 재료를 넣고 인간의 보행으로부터 에너지를 얻거나, 혈류로부터 아주 미세한 에너지를 얻어서 센서에 전력을 공급하는 등의 실험이 이루어졌다.

이외에도 복도에 설치하여 전력을 얻는다든지 교량이나 도로의 시설물에 장착하여 에너지를 얻는 실험들이 다수 진행되었다. 대표적인 연구기관으로는 미국 버지니아 공대에서 매년 학회가 열리고 있으며, 다수의 미국 대학기관 및 국내 KIST등에서 활발히 연구되고 있다.

### 3.2 Pyroelectric energy harvesting

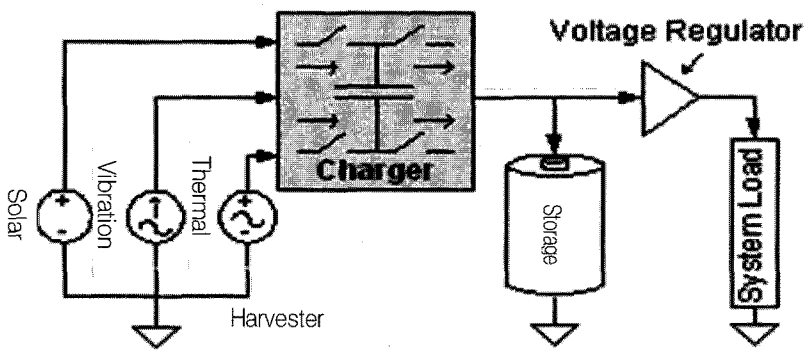
Pyroelectric 효과는 온도를 전류나 전압으로 변환하는 현상으로 피에조 효과와 유사하다. 이 방법은 피에조 방법에 비해 전력 효율이 낮다. 열전쌍보다 한 가지 장점은 피로 재료들이 섭씨 1,200도 이상까지 도 안정적인 재료 특성을 가지고 있다는 것이다. 피로전기는 전기자석과 같은 세라믹 소재에 열을 가하면 양단에서 전압이나 전류를 얻을 수 있다는 점에서 열전쌍과는 다르다. 낮은 전력 효율로 연구활동이 비교적 활발하지 못하다.

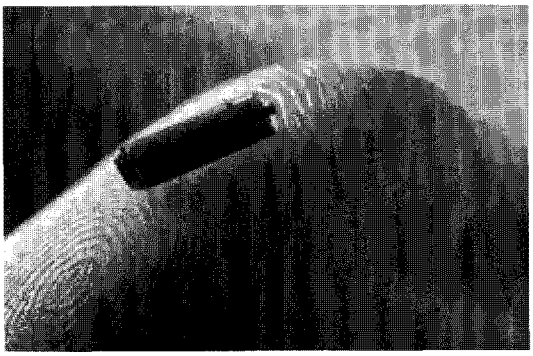
### 3.3 Electrostatic (capacitive) energy harvesting

이 방식은 최초에 충전된 Varactor가 진동을 받으면 충전용량이 변화되어 진동 에너지를 전기에너지로 바꾸는 방식이다.

## 4. System 측면에서의 Energy Harvesting

Energy Harvesting은 에너지를 획득하는 방식 및 재료뿐만 아니라 시스템적인 접근도 매우 중요하





다. 일반적으로 에너지 하베스팅 시스템의 블록도를 아래의 그림과 같이 표현할 수 있다.

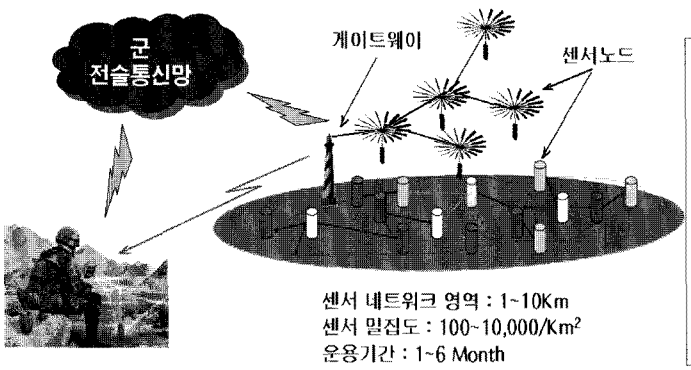
여기서 에너지 획득 장치는 태양광, 진동, 온도 등이 각각 사용되기도 하지만 상황에 따라 서로 조합되어 사용될 수 있으며, 각각의 방식은 전술한 바와 같다. 각각의 에너지 원으로부터 오는 전력의 생산 양태는 서로 매우 다른 특성을 가지고 있어서 이에 맞는 Charger가 연구되고 있다. Charger는 기존의 연구가 많이 진전되어 있는 분야이기는 하지만 저전력에서 기동되는 특성에 따라 홍콩대학과 펜실베니아 대학에서 저 전력 정류 장치에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

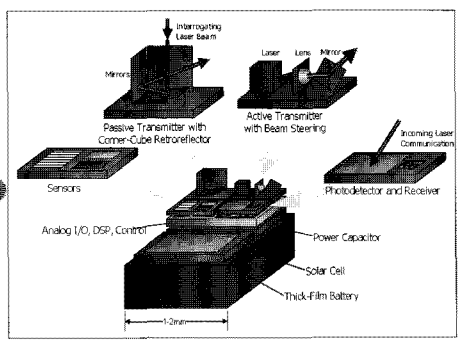
에너지원에서 출력되는 에너지가 시간 별로 에너지원 별로 매우 다른 특성을 가지고 있기 때문에 생산된 에너지를 축전하여 사용해야 할 필요가 있으며, 이 분야의 연구 방향으로는 마이크로 배터리, 슈퍼 캐패시터등이 연구되고 있고 일부 실용화에 근접하였다. 주요 회사로는 Rocket, Power Paper, EaglePicher Medical Power社 등이 있으며, 이들은 Paper 배터리, 마이크로 배터리 등을 실용화 연구하고 있다.

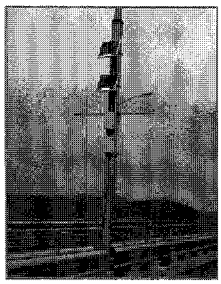
## 5. 응용분야 및 연구동향

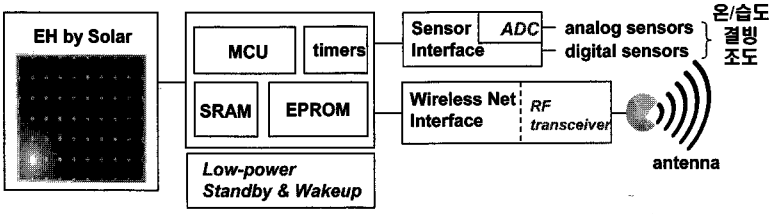
군사적인 목적의 연구 방향은 전장에서 센서 노드를 살포하여 C4I 체계와 연동 시 센서 노드의 전력 공급을 위하여 연구되고 있으며, 가장 유명한 것이 Smart Dust에 적용된 것이다.

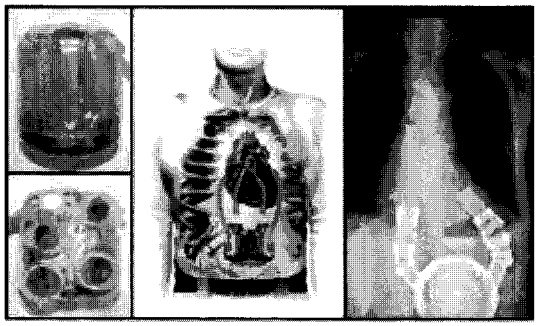
또한 인프라와 건축물의 구조 안전성 및 교량의 안전 진단 분야에도 적용되고 있는데, 아래 그림은 교량의 노면 결빙을 모니터링 하는 시스템의 예를 보여주

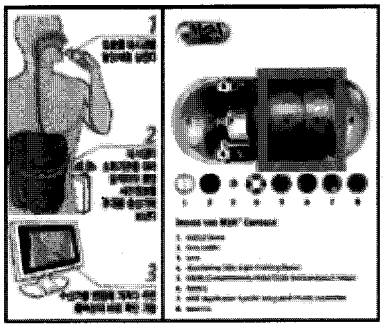








고 있다.

한편 의료 분야에서도 응용이 되고 있으며, 인공심장, 캡슐형 내시경 등에 적용된 사례가 발표되었다.

## 6. 결 론

에너지 하베스팅 분야는 다가 올 모바일 기기와 네트워크의 변화를 전제로 발전되고 있으며, 현재의 배터리 기술 만으로 극복하기 어려운 문제를 해결 할 대안으로 연구되고 있다. 이미 국내의 연구 수준이 소재에서 시스템까지 많은 부분 역량이 준비되어 있는 분야 이기도 하다. 따라서 보다 더 현실적인 문제, 예를 들면 SoC에 Embedded 하기 위해 필요한 요소 기술 등의 개발이 필요하다. 지구 온난화의 문제 등으로 이제 우리의 환경을 측정하기 위한 새로운 인프라를 요구하는 시대로 가고 있다. Web3.0이라고 하는 Sensor Web 또는 M2M 등의 지향하는 바가 보다 더 변화가 빠른 환경에 대처하기 위해 실시간으로 환경을 모니터링해야 한다는 전제하에 발전하고 있다면, 에너지 하베스팅 기술은 이를 뒷받침할 수 있는 요소 기술로써 반드시 필요하다고 하겠다. 더군다나 최근 여러 가지 센서 그리고 시스템등이 저 전력화되어 미소 전력으로도 충분히 구동될 시대가 멀지 않다. 풍부하고 돈이 들지 않는 에너지의 획득은 그린 기술의 한 핵이 되어야 하지 않을까 한다.

### ◇ 저 자 소 개 ◇

**최창수**

1966년 1월 15일생. 1992년 광운대학교 전자공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 졸업(박사). 1995~2000년 국방과학연구소 선임연구원, 관성항법장치 개발. 2002~2006년 미국 Nexian CTO 재직. 2007~2010년 LS산전 통신연구단 단장.

Tel : 010-2635-6411

E-mail : drchoics@gmail.com