

ISSN. 2465-8456

2020 September | Vol. 6

09

융합연구리뷰

Convergence Research Review

김찬수(한국과학기술연구원 연구원)
감염병 전파와 방역정책

송현철(한국과학기술연구원 선임연구원)
에너지 하베스팅 기술

CONTENTS

- 01 편집자 주
- 03 감염병 전파와 방역정책
- 19 에너지 하베스팅 기술



융합연구리뷰 | Convergence Research Review
2020 September vol.6 no.9

발행일 2020년 9월 7일

발행인 김주선

발행처 한국과학기술연구원 융합연구정책센터

02792 서울특별시 성북구 화랑로 14길 5

Tel. 02-958-4980 | <http://crpc.kist.re.kr>

펴낸곳 주식회사 동진문화사 Tel. 02-2269-4783



감염병 전파와 방역정책

올해 3월, 세계보건기구(WHO)가 팬데믹을 선포한 이후, 세계 각국은 해외 유입 감염자의 차단, 감염자 조기 진단, 접촉자의 신속한 추적 및 확인 등 코로나 바이러스의 차단과 대응을 위해 총력을 기울이고 있다. 그럼에도 불구하고 전 세계적으로 코로나-19 확진자 수는 좀처럼 줄어들지 않고 있다. 감염병의 확산으로 인한 피해를 줄이기 위해서는 감염병의 전파 양상을 분석하고 중재 방법의 효과를 예측해야 필요가 있다.

첫 감염병 확산의 수학적 모델인 1760년 베르누이(Bernoulli)의 천연두 모델링 이후 소프트웨어 및 슈퍼컴퓨터의 개발로 더욱 정교해진 감염병 시뮬레이션 모형들이 등장했다. 본 호 1부에서는 커맥(Kermack)과 맥켄드릭(McKendrick)이 1927년 제안한 질병 예측 모델인 S-I-R 모형을 소개하고 저자가 개발한 감염병 전파 예측 시뮬레이션 모형을 활용하여 코로나-19 방역을 위하여 실시되는 사회적 거리두기, 마스크 착용, 손 씻기, 해외 유입자 관리 및 초·중·고 오프라인 등교 등 코로나-19 대응 정책의 효과를 알아본다.

코로나-19 백신 또는 치료제가 아직 완전히 개발이 되지 않은 현 상황에서, 감염병 전파 예측 시뮬레이션 모형은 신뢰성 있는 코로나-19 대응 정책을 체계적으로 수립하는 데 도움이 될 것이다. 또한 코로나-19에만 국한되지 않고 다른 감염병 유행 시에도 감염병으로 인한 사망자 및 환자의 수의 감소는 물론 환자들이 부담해야 하는 의료비용 감소에도 일조할 것으로 생각된다. 코로나-19뿐만 아니라 이후의 감염병 대응 정책에도, 개발된 감염병 전파 시뮬레이션 모형이 적극적으로 활용됨으로써 감염병 확산 중재에 기여하기를 기대해 본다.

에너지 하베스팅 기술

현재 인간이 살아가는 데 꼭 필요한 것 중 하나를 손꼽으라고 한다면 에너지(energy)일 것이다. 에너지라는 개념 자체가 매우 추상적이지만 우리 주변에 어떠한 형태로든 항상 존재하고 있는 것은 분명하다. 햇빛, 파도, 조류, 바람, 지열, 지자기와 같은 대규모 에너지 외에도 산업기계, 자동차, 빌딩, 다리, 보일러 등과 같이 우리 생활 주변에서도 진동, 열, 빛, 전자기파 같은 여러 형태의 소규모 미사용 에너지들도 많이 존재한다. 우리 주변 환경에서 버려지는 소규모의 미사용 에너지를 수확하여 사용 가능한 형태의 전기 에너지로 변환·이용하는 것을 “에너지 하베스팅(Energy harvesting)” 기술이라고 한다.

이에, 본 호 2부에서는 여러 에너지 하베스팅 기술에 대해 알아보고, 실생활에서 적용되어 있는 각종 사례에 대해 알아보았다. 기계 에너지를 전기 에너지로 변환하는 방법에는 압전(Piezoelectric), 마찰전기(Triboelectric), 전자기 유도(Electromagnetic induction), 정전(Electrostatic) 등의 에너지 변환 메커니즘이 있으며 규모와 응용 방법에 따라 적합한 에너지 변환 메커니즘을 사용한다. 국내외에서는 이렇게 다양한 에너지 하베스팅 기술을 기반으로 IoT 센서 전원, 도로 장치, 웨어러블 등을 위한 전기 에너지를 생산해내고 있다.

본 호 2부를 통해 채 20년이 되지 않고, 2010년대에 이르러서 본격적인 연구가 시작된 비교적 새로운 기술인 에너지 하베스팅에 대해 알아보았다. 아직까지 실용화되어 제품으로 출시된 경우는 손으로 셀 수 있을 정도로 불과하지만, 에너지 하베스팅 기술을 필요로 하는 응용처는 갈수록 증가하고 있기에 해당 기술의 무궁무진한 발전을 기대해 본다.

융합연구리뷰

Convergence Research Review 2020 September vol.6 no.9



01

감염병 전파와 방역정책

김찬수(한국과학기술연구원 연구원)

I 서론

신종 코로나 바이러스 감염증-19(코로나-19)가 전 세계를 강타했다. 코로나-19 확산은 거의 한 해가 다 되어가는 지금도 줄어들지 않고 여전하다.

코로나-19는 기존의 호흡기 바이러스 감염병과 달리 높은 전염성으로 인해 전 세계에 엄청난 규모로 창궐했다. 코로나-19의 급속한 확산에 따라 결국 세계보건기구(WHO, World Health Organization)는 2020년 3월 11일, 홍콩 독감(1968), 신종인플루엔자(2009) 대유행 때에 이어 세 번째로 ‘전 세계 유행(팬데믹, Pandemic)’을 선포하였다. 특히 코로나-19는 사스(SARS; 2~7일)나 메르스(MERS; 6일)에 비해 4~14일이나 되는 훨씬 긴 잠복기를 가지며 30~40%의 집단감염 가능성을 보이는 감염병으로써, 각 개별 국가들도 이를 고려하여 선제적으로 대응해야함을 천명하였다.

이렇게 긴박한 상황에도 불구하고, 백신이나 치료제가 개발되지 못한 상황에서 코로나-19의 감염과 전파를 적절하게 차단하는 일은 어려운 과제이다. 감염 과정조차 과학적으로 세세히 밝혀지지 않은 까닭에 감염 상황을 제대로 파악하기도 무척 까다롭다. 따라서 실제로 치명률이 높은 코로나-19의 전파를 차단하고, 적어도 이를 지연시켜야 하는 상황에서는 우리 사회에 적용 가능한 방역정책이나 완화 전략을 설계하고 그 효과에 대해서 사전에 계산하여 확인하는 등의 연구가 요구된다.

적절하고 정확한 과학적 분석을 통해 이들을 ‘직조(織造)’해내거나 시뮬레이션(simulation)함으로써 그 확산의 규모와 유행의 방향에 대해 예측할 필요가 있다. 제한적인 정보를 이용하더라도, 역학 관련 데이터를 활용해 코로나-19에 대한 발생 추이를 예측하고 방역 효과를 분석하여, 그 유행의 추세 예측과 더불어 국민의 활동까지 고려한 정책이 필요하다.

II 본문

감염병은 어떻게 전파되는가? 감염병이 확산되는 것은, 사람들 사이에 소문이 전파되는 것, 뉴런들 사이에서 정보가 퍼져나가는 것과 본질적으로 같은 현상이다. 이들 현상을 하나의 모형으로 만드는 데에는 2020년 현재, (1) 미분방정식 방법을 사용하거나 (2) 복잡계(complex system)에 기반하여 대용량 슈퍼컴퓨터를 이용하는 방법이 있다. 둘 다 응용수학의 한 갈래인데, 시뮬레이션(시뮬네이션·전산모사)을 진행할 때에 어디에 초점을 두는가 하는 점이 다르다.

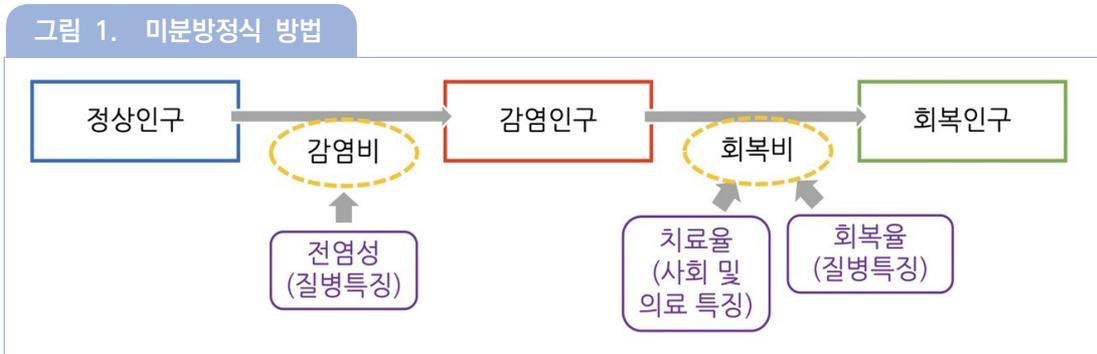
한국과학기술연구원(KIST)은 특히 ‘다차원(multiscale)’의 이해와 접근 방식으로써 ①S-E-I-R 과 같은 미분방정식 모형, ②거대규모 계산에 기초한 행위자기반 모형, ③인공지능과 같은 머신러닝 계산방법, 그리고 ④역학 몬테칼로 모형 등을 개발하여 종합적으로 운용하고 있다.

미분방정식 모형은 그 모수(파라미터, parameter)를 수득하는 일에 몇 가지 가정을 필요로 하지만 대개 간명하고 빠른 계산이 가능하므로 전체 집단의 전파나 확산 양상을 살피는데 유용하다. 다만 사회 구성원 전체(때, 무리)에 적용하게 되므로 다양하고 세밀한 방역정책을 설계·평가·적용하기에는 한계가 있어, 사회 전체에 적용하거나 비교적 추상적인 관점에서 사용된다. 많은 양의 계산 자원과 다양한 기초 데이터를 요구하는 거대규모 행위자기반 모형은 개인을 계산의 기초 단위로 삼고 있으므로 세세한 방역정책을 실험해볼 수 있다. 예컨대 개인 한 명이 가지고 있는 나이·성별·지역 등의 속성에 따라서 각기 다른 이동 수칙 등의 질병전파 완화정책을 과학적으로 설계하고 사전에 평가해 볼 수 있다. 역학 몬테칼로 모형은 미분방정식 모형과 개인기반 모형의 중간에 자리하고 있는데, 거대규모 모형에 비해 짧은 시간에 유행을 예측하고 관련된 방역정책을 다루어 볼 수 있다. 신속한 계산이 가능한 대신에, 방역정책의 대상이 개인 수준이 아닌 까닭에 그 구체성이 떨어진다. 그러나 개별 그룹 단위에서 계산을 수행하며 정책을 적용해 볼 수 있어 가구(household)나 집단, 세대(generation)를 다루는데 의미가 있다.

표 1. 감염병 전파에 대한 접근 방식

방법	주요 원리	특징
미분방정식 모형	<ul style="list-style-type: none"> • 사람들 “무리”의 상태를 기반으로 하여 정상, 잠복, 증상발현, 회복 등의 ‘무리’로 구분 • 각 상태로 변화를 가정하고 해당 변화율 모수를 파악하여 활용 	<ul style="list-style-type: none"> • 가장 오래된 계산 방법이지만 가장 간단한 접근으로 신속한 계산이 가능 • 상태 변화의 확률을 구하는 것이 어려움
거대규모 행위자기반 모형	<ul style="list-style-type: none"> • 개인을 기초 단위로 하여, 개인의 다양한 속성을 제시 • 이와 관련된 사회·의료·과학적 정보·빅데이터를 적용 • 주변 환경에 따른 개인의 행위와 감염 여부를 추계적(stochastic)으로 분석하고 슈퍼컴퓨터를 이용하여 거대규모로 계산하여 활용 	<ul style="list-style-type: none"> • 이동, 건강정보, 교통 등 유행 예측 고려 • 개인 수준의 방역정책 개발을 위한 다양한 변수 설계 • Bottom-up 방식으로 개별 차이에 의한 전체 변동을 이해하고 개인 차이 반영 • 모형의 구체성 확보를 위한 컴퓨팅 자원 필요
역학 몬테칼로 모형	<ul style="list-style-type: none"> • 개인들의 속성이 공유된 집단을 대상으로 하고 이들의 속성을 정의 • 역학적 몬테칼로의 방식으로 시공간에 따른 집단의 관계망 변화를 추산하여 전파 양상을 계산 	<ul style="list-style-type: none"> • 계산 시간이 상대적으로 짧음 • 시공간의 이동을 명시적으로 표현하는 대신 관계로써 정의하고 추계적 계산 수행 • 개인보다는 집단 수준의 방역정책 설계·평가 가능
통계 분석 방법	<ul style="list-style-type: none"> • 코로나-19 검색빈도, 통신데이터, 교통정보 등 직·간접적 빅데이터를 통계적으로 해석 • 현재 양상을 기준으로 하여 변화량을 계산함으로써 이후의 발생 추이를 예측 • 정보(량)의 업데이트 방식을 차용 	<ul style="list-style-type: none"> • 계산 시간이 상대적으로 짧음 • 정확도 향상을 위해 많은 양의 데이터가 필요 • 통계적 가설 검정이 가지는 한계 내포

미분방정식 방법을 이용하는 경우는 사회 구성원을 하나의 큰 덩어리(무리, 덩어리)로 본다. 주로 S-(E)-I-R 모형을 활용하는데, SEIR은 (정상인)감염 대상군(Susceptible), 질병 노출(Exposed), 감염(Infected), 회복(Removed)의 영어 단어 앞 글자를 따온 말이다. 미분방정식을 쓴다는 것은, 욕조에 물을 채우는 상황에 비유될 수 있다. 감염인구 무리를 하나의 욕조라고 한다면, 여기에 물을 채우는 수도꼭지는 감염율이 된다. 수도꼭지를 열고 닫는 것은 질병의 특징으로써 전염강도와 감염·비감염인구의 접촉 수에 의해 결정된다. 그리고 물을 빼는 수도꼭지는 회복율에 비유된다. S-I-R 모형은 1927년 커맥(Kermack)과 맥켄드릭(McKendrick)이 질병 유행의 초기, 조건과 확산 정도를 예측하기 위해 사용하면서 처음 제안됐다.



출처 : 저자 연구그룹 연구결과 인용(한국과학기술연구원)

S-E-I-R 모형은 S와 I 사이에 접촉군 단계(E)를 추가한 모형이다. 즉, 잠복기가 고려되어 있다. 인구 떼(무리)의 상태를 늘림으로써 다양한 모형을 만들거나 확장할 수 있다. 비교적 간단히 풀 수 있으므로 여러 분야에서 활용하기가 어렵지 않다. 그러나 이 모형에는 ‘공간’을 포함할 수 없다는 점이 단점이다. 또한 인구 떼의 상태가 변화하도록 하는, ‘수도꼭지’의 값(파라미터의 값)을 명확히 구하기가 어렵다.

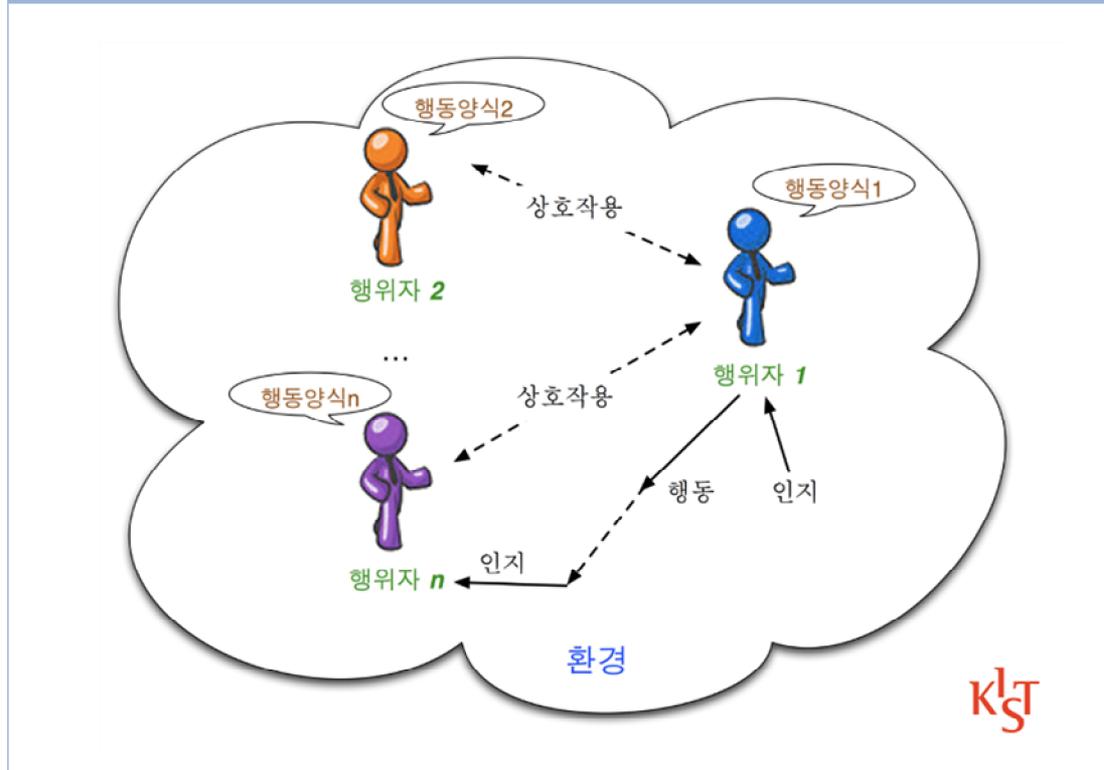
컴퓨터의 계산능력이 발전하여 슈퍼컴퓨터가 만들어지고, 복잡계 현상에 대한 이해가 깊어지면서, 개인에 초점을 맞춘 모형들이 제안되었다. 복잡계는 ‘나비효과’ 또는 ‘눈덩이(스노우볼) 효과’ 등으로 유명한데, ‘나비효과’와 같이 하나의 매우 작은 변화가 전체의 변화를 야기하는 경우를 말한다. 나비효과란 북경에 있는 나비의 날갯짓이 대기에 영향을 주고, 시간이 지날수록 이 영향이 점점 커져서 오랜 시간 후에 허리케인이 되는 현상을 칭한다. 세계적으로는 현재 영국의 Imperial London 대학, 미국의 Los Alamos 연구소 연합, 한국의 한국과학기술연구원(KIST) 등을 위시한 서너 개의 기관이 각 국가 인구 단위에 맞추어 연구를 진행 중이다. 이들의 연구는 각국과 세계에서 방역 정책의 방향을 결정하는데 실제로 활용되고 있다.

이러한 연구에서 앞서 언급한 S-(E)-I-R 모형에서와 같은 인구 떼(무리)의 상태를 ‘개인’에게 적용한다. 이 개인들의 움직임은 교통이나 통신 등의 빅데이터를 통해 결정된다. 주어진 공간에서 개개인이 감염질환에 노출되고 잠복기를 거쳐 증상이 나타났다가 회복되는 상황이 시뮬레이션(시뮬레이션) 된다. S-(E)-I-R 모형에서 개인의 움직임은 서로 상호작용하는 입자처럼 움직인다. 개인을 상징하는 입자 하나 하나는 제각각 이동 데이터를 반영해 움직이면서 서로 만나고 헤어진다. 이 과정에서 질병이 확산되는 것이다. 당구대와 당구공에 비유하면 하얀 당구공만 있는 당구대에 노란색의 물감이 묻은 당구공이 들어가서 다른 당구공과 부딪히며 같은 색이 묻은 당구공의 수를 늘리는 것과 같다. 이때 당구공들이 서로 덜 만나게 하는 일종의 ‘적절한 방역 조치’를 취하면 노란 물감이 덜 묻는 식인데, 방역의 효과는 복잡계나 수리적인 시각에서 측정된다.

이러한 시뮬레이션 방법은 개인에게 적용할 수 있는 여러 정책을 모사하고 평가할 수 있는 장점이 있다. 한국의 경우, 5천만 명 이상의 개인을 실제 모형화하여 대규모 컴퓨터 계산을 수행한다.

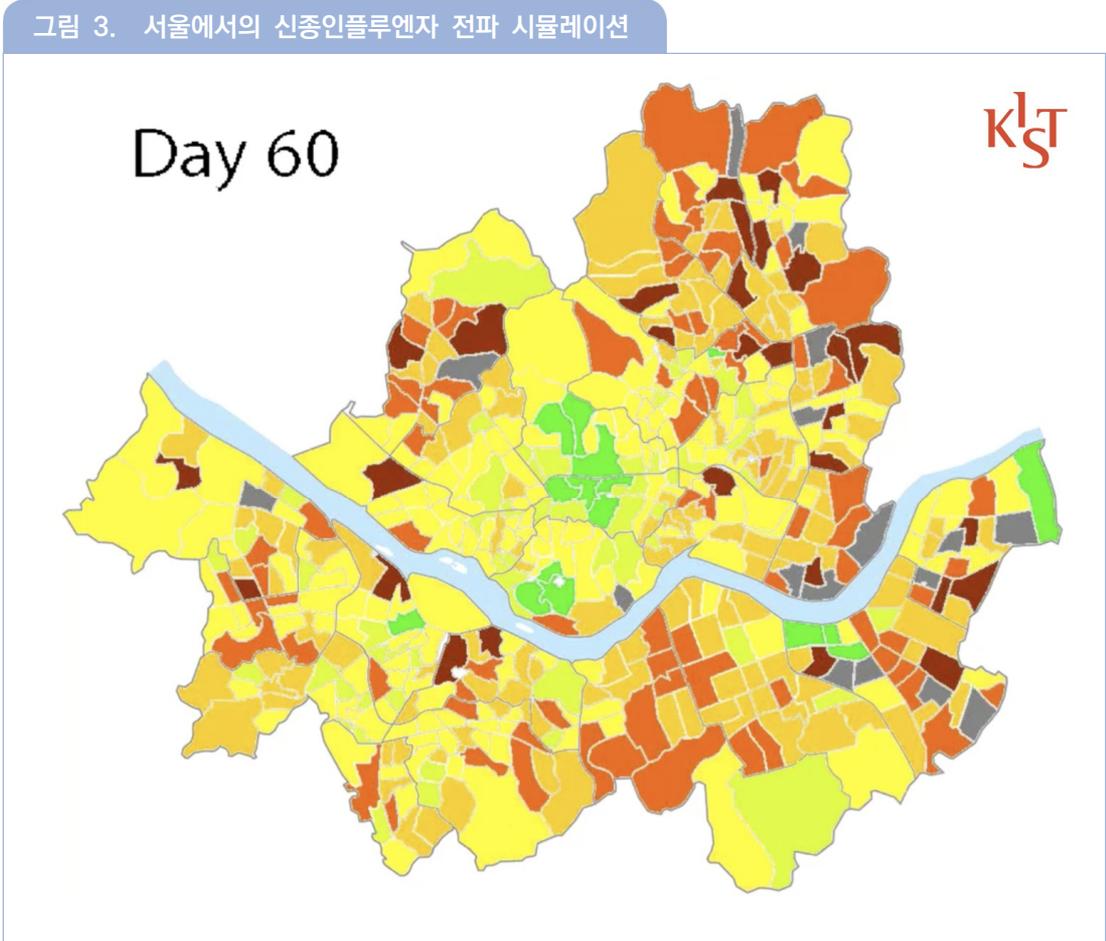
질병이 가진 감염 관련 특징들도 포함되어 어떻게 ‘확산되는가’에 대한 부분들이 고려된다. 뿐만 아니라 이러한 방법이 가진 특징 때문에 질병의 전파에 영향을 미치는 사람들 개개인의 이동 및 상호작용과 관련된 ‘이동’과 ‘공간’이 고려된다.

그림 2. 한국과학기술연구원 시뮬레이션 도구(KIST's Individual-based Simulation Tool for Transfer phenomena)



출처 : 저자 연구그룹 연구결과 인용(한국과학기술연구원)

신종인플루엔자의 경우에는 서울의 인구(980만 명)를 대상으로 아웃브레이크(outbreak, 감염병 대유행) 상황을 수퍼컴퓨터 상에서 시뮬레이션해 본 바 있다. 이를 통해 나이 또는 성별, 건강상태에 따라 개인별 백신 전략을 세우거나 이동 동선을 제한하는 등의 정책을 수립·평가할 수 있었다.

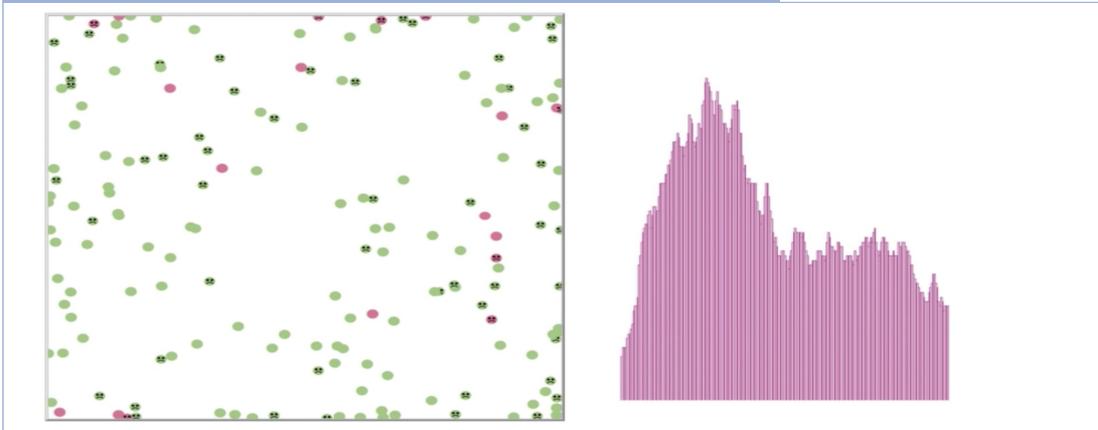


출처 : 저자 연구그룹 연구결과 인용(한국과학기술연구원)

비슷한, 그러나 더욱 정교해진 계산 시뮬레이션 모형을 활용하여, 코로나-19를 효과적으로 예방하기 위한 다양한 정책이 시뮬레이션되고 평가되었다. 예컨대, 사회적 거리두기, 마스크 착용-손 씻기, 해외 유입자의 관리, 등교 시점의 평가, 미규명 감염자의 수 추정, 추석 연휴 및 연말 방역정책 등이다. 이는 모두 개인의 행동들로 나타나는 사회의 변화로 가능되어 방역정책의 과학적 근거가 되었다.

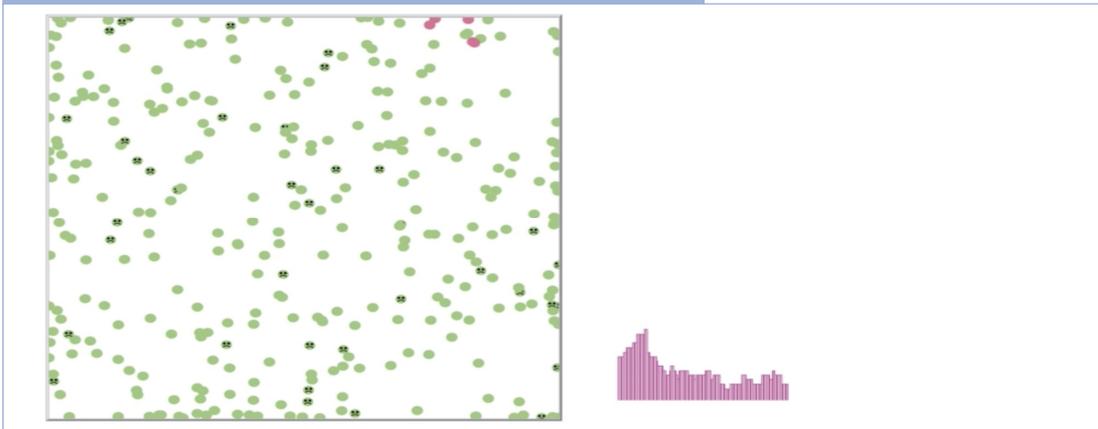
사회적 거리두기를 수행한 경우 감염자가 훨씬 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 사람 한 명이 돌아다니는 횟수가 줄어들 때 감염자가 줄어든다. 과학적인 입장에서 사회적 거리두기가 왜 '작동하는지'를 이해할 수 있다.

그림 4. 사회적 거리두기를 시행하지 않은 경우(분홍입자는 환자)



출처 : 저자 연구그룹 연구결과 인용(한국과학기술연구원)

그림 5. 사회적 거리두기를 시행한 경우(분홍입자는 환자)



출처 : 저자 연구그룹 연구결과 인용(한국과학기술연구원)

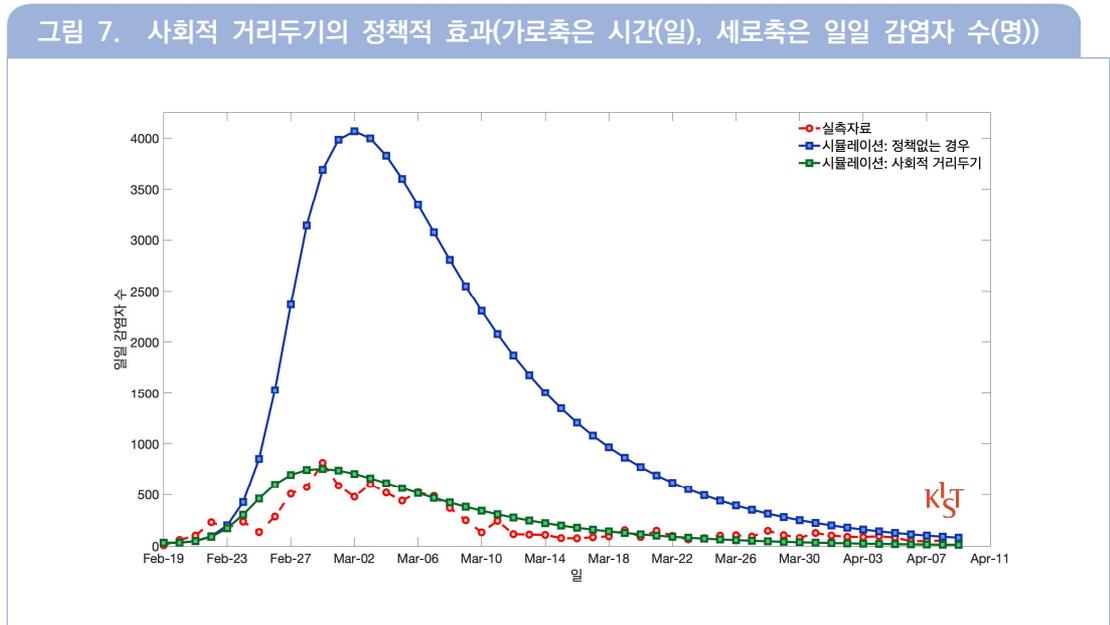
위의 <그림4>와 <그림5>는 ‘사회적 거리두기’의 개념을 나타낸다. 각 그림들의 분홍색 그래프에서 가로축은 시간(일)을 의미하고, 세로축은 일별 감염자 수(명)를 뜻한다. <그림5>와 같이 사회적 거리두기를 시행한 경우에는 거리두기를 시행하지 않은 경우(<그림4>)에 비해서 사람들의 이동이 훨씬 줄었고 사람들은 덜 만나게 된다는 것을 알 수 있다. 그리고 그럴수록 감염병을 확실히 덜 옮기는 사례를 보여준다. 본 시각화는 그림으로 보는 것보다 해당 영상으로 확인하면 그 의미를 더 확실하게 알 수 있다.

<https://www.youtube.com/watch?v=dhTtabS9bOw>.

이러한 개념을 도미노에 비유하여 표현한 그림은 아래와 같다. “어느 누구 한 명이 만남을 쉬어갈 때 덜 옮긴다”는 개념이다.



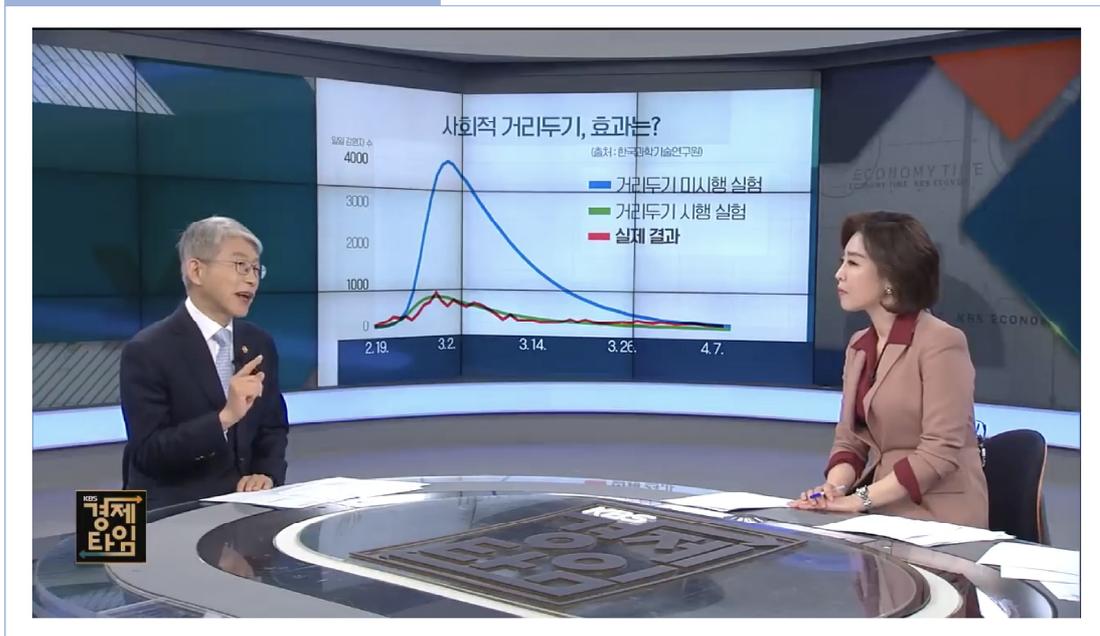
출처 : 저자 연구그룹 연구결과 인용(한국과학기술연구원)



출처 : 저자 연구그룹 연구결과 인용(한국과학기술연구원)

한국과학기술연구원 연구팀은 먼저, 위의 <그림7>처럼, ‘아무런 정책이 없는’ 경우와 ‘보통의 사회적 거리두기가 있는’ 경우를 계산하였다(2020년 2월 25일 결과물). 한국이 시행하고 있는 수준의 사회적 거리두기 등의 조건에서 일일 감염자는 3월 2일쯤 절정에 달할 것으로 추정되었고, 실제 일일 확진자의 통계 추이와 상당히 유사한 결과로 나타났다.

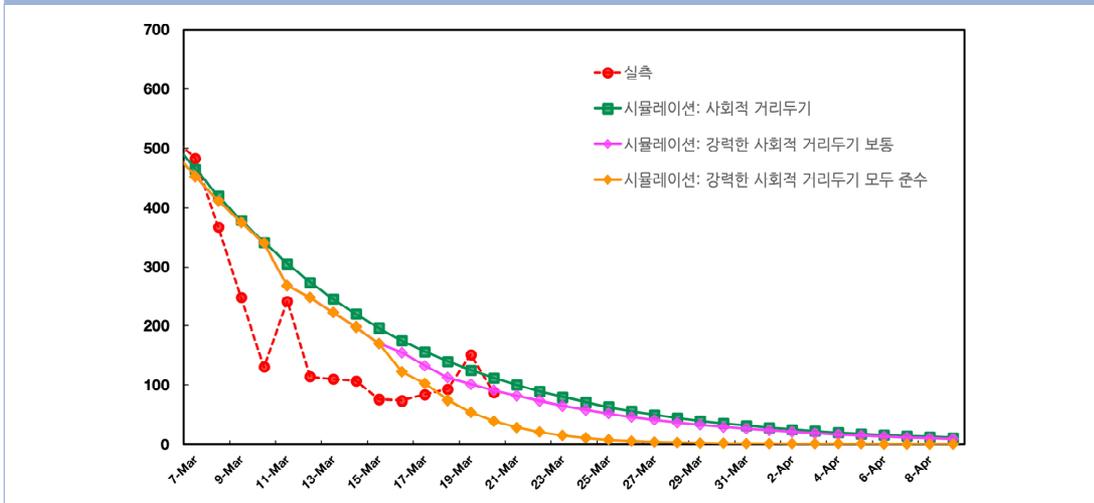
그림 8. 사회적 거리두기의 효과



출처: KBS뉴스 경제타임

비교적 ‘강력한 사회적 거리두기’의 시행 후 일반적인 정책 효과를 계산한 결과, 국민의 20% 이상의 감염자가 감소할 수 있는 것으로 드러났다(2020년 3월 5일 계산 결과). 이미 감소세에 있는 현재의 추이는 사회적 거리두기, 손 씻기, 마스크 착용하기, 공간 방역 조치 등의 정책을 지속적이고 안정적으로 시행할 경우 계속 유지될 가능성이 높은 것으로 나타났다.

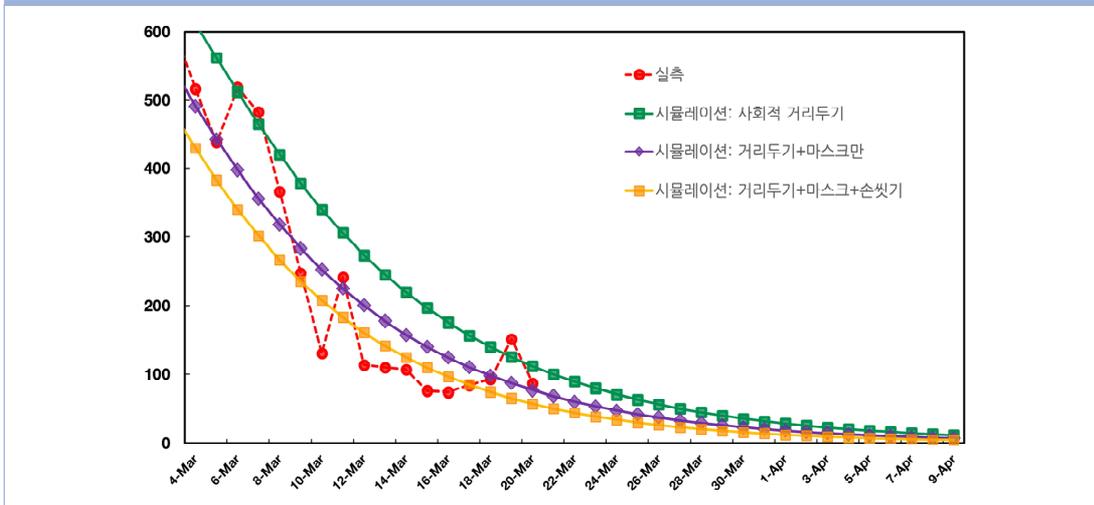
그림 9. '강력한 사회적 거리두기'의 실천이 요구됨(가로축은 시간(일), 세로축은 일일 감염자 수(명))



출처 : 저자 연구그룹 연구결과 인용(한국과학기술연구원)

'손 씻기'에 대한 중요도도 평가가 가능했다(2020년 3월 16일 계산 결과). 마스크를 착용하고 사회적으로 거리를 두더라도, 손 씻기 등을 철저히 하여야 사회적 감염의 확산을 방지하는 데 매우 긍정적이었다.

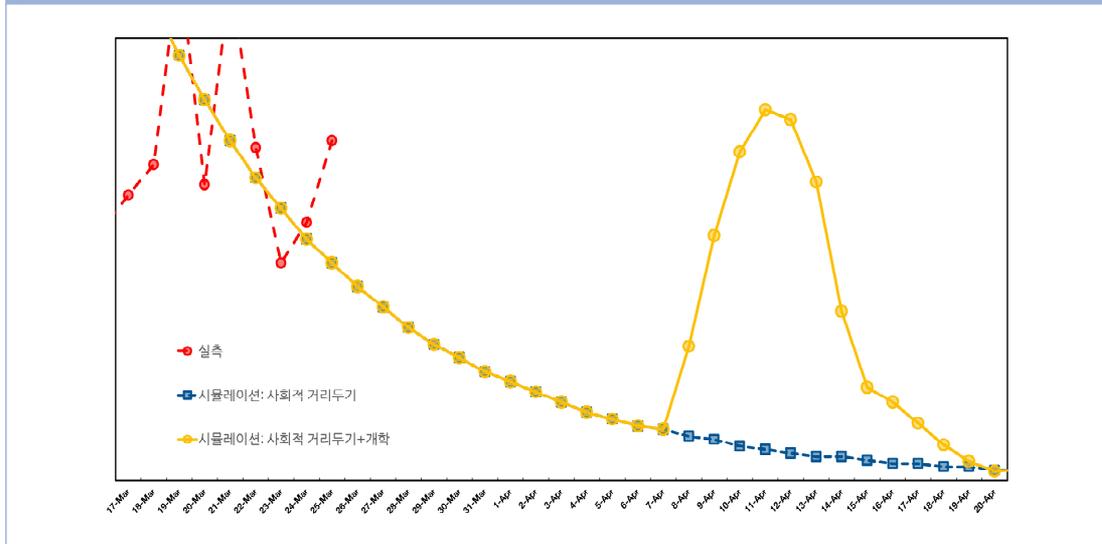
그림 10. '사회적 거리두기'를 시행하여, 마스크 착용, 손 씻기 등을 선별적, 복합적으로 수행했을 때의 차이를 나타낸 그래프 (가로축은 시간(일), 세로축은 일일 감염자 수(명))



출처 : 저자 연구그룹 연구결과 인용(한국과학기술연구원)

2020년 4월 6일 개학이 코로나-19의 확산에 어떠한 영향을 미칠 수 있는지도 평가되었다(2020년 3월 25일 결과). 아무런 준비 없이 오프라인 등교 개학을 할 경우, 감염자가 급속히 증가하는 소규모의 피크¹⁾(학계와 외신 등에서는 2차 혹은 3차 등의 추가 피크로 표현)가 나타난다. 바로 위의 결과와 묶어서 해석하면, 학생들이 공동체 생활을 시작할 경우, ‘사회적 거리두기’를 유지하며, ‘마스크 제대로 착용하기’와 ‘손 씻기’를 비롯한 강력한 방역조치들을 시행할 필요가 있다는 점 또한 시사(示唆)하고 있다.

그림 11. 개학 후 급속한 감염자 수 증가로 비대면 접촉 상황 유지가 필요함을 보여주는 결과



출처 : 저자 연구그룹 연구결과 인용(한국과학기술연구원)

오프라인 등교 개학의 시점에 따른 변화도 고려된 바 있다. 우선 3월 20일 이전에는 ‘일반적 사회적 거리두기’를 준수하고 있다. 3월 20일 이후에는 ‘강력한 사회적 거리두기’(평균 2.5~4.5명 접촉)를 따른다. 다만, 그 준수율이 100%²⁾보다 낮다고 입력하였다.

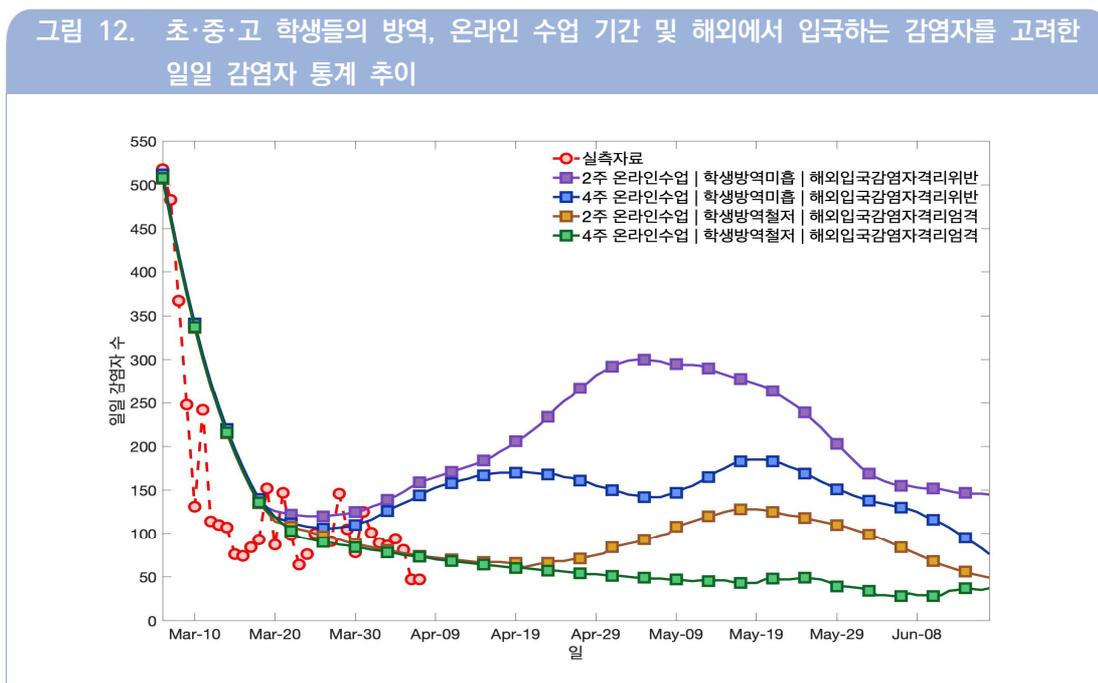
또한, 본 한국과학기술연구원 계산모형에 3월 23일을 전후³⁾로 하여 대략 60여 일간 코로나-19 감염자가 평균적으로 해외로부터 기존의 해외 유입 수만큼 입국한다고 입력하였다. 이들 해외 입국 감염자들은, 실측자료에

1) 피크: 일일 감염자 수가 주어진 기간 동안에 증가했다가 다시 줄어드는 일종의 최대값
 2) 준수율이 높은 「일반적 사회적 거리두기」와 달리 「강력한 사회적 거리두기」는 (1) 제재의 강도가 너무 강하고 (2) 긴 시간 질병(코로나-19)에 대응한 터라 국민들의 피로도가 적지 않다. 따라서 「강력한 사회적 거리두기」가 100% 달성되고 있다고 보는 것은 너무 강한 가정이다. 실제로도 지난 3월 말에는 지역 사회의 차량 통행률이 전 달에 비해 한결 증가했다는 보고가 있다(2020년 4월 4일 중앙대책본부 발표).
 3) 3월 22일~25일 사이

서와 마찬가지로 일일 감염자 수에 집계된다(중앙대책본부 등에서도 해외에서 유입된 감염자 수를 일별 집계에 포함한다).

- 초·중·고 학생들의 방역은 교육부의 권고 방안을 참조하여(학생들 기준에서 방역이 이뤄지는 것을 상정) 두 개의 그룹으로 나누었다. 손 씻기와 마스크 착용을 게을리하는 학생들의 비율이 높은 경우를 '미흡'으로, 마스크를 철저히 착용하고 손을 잘 씻는 학생들의 비율이 더 높고 확진자 발생 시 격리하는 조치를 포함한 경우를 '철저'로 정의하였다.
- 여기에 초·중·고교들의 온라인 수업 기간이 2주일 때와 4주로 정해질 때를 각각 고려하였다.
- 마지막으로 해외에서 입국하는 감염자들이 모두 추적되어 잘 격리되는 때와 일정 비율의 감염자가 격리를 위반하고 돌아다니는 경우를 가정하였다.

우리나라가 시행하고 있는 수준의 사회적 거리두기 등의 조건에서 한국의 일일 감염자의 통계 추이를 얻을 수 있었다. 시뮬레이션을 통해서 얻어진 결과(2020년 4월 4일 도출)는 아래와 같다.



출처 : 저자 연구그룹 연구결과 인용(한국과학기술연구원)

해외에서 유입되는 감염자들과 학생들의 방역이 용이하지 않은 경우, 작은 크기지만 '새로운 피크'의 발생 가능성이 포착되었다. 외부 유입이 있는 비평형의 사회시스템을 가정한 계산을 통해서 몇몇 정책에 담긴 의미가 파악될 수 있었다.

방역정책과 같은 외부 요인의 유입이 '어떠한 변화'를 만들어내는가를 탐구하는 것이 바로 이러한 시뮬레이션(시뮬레이션)의 진정한 의미이다. 즉, 사회의 특성으로 해석되어야 할 변수인 '감염재생산지수(R)'를 외부의 입력을 통해서 직접 조정하는 것이 아니라 여기에 영향을 미치는 감염률과 접촉률 등을 개인을 기반으로 하여 조정한다. 이 값이 현실에서 바뀌고 있듯, 시뮬레이션 상에서도 시간에 따라 변하고 있다. 또한 동 계산 결과가 100% 정확한 미래를 예측하는 것은 아니지만, 사회의 질병 확산 추이를 경감하기 위해 어떻게 행동하는 것이 좋을지를 함축한다.

본 연구는 과기정통부(장관 최기영) 지원으로 한국과학기술연구원(KIST) 주요사업과 한국과학기술연구원(KIST) Economic & Social Simulation Research Initiative(ESRI) 과제 등의 연구 사업으로 수행되었다.

III 결론

신종 감염병을 효과적으로 막아내기 위해서는, 초기의 대처가 매우 중요하다. 특히 다양한 방역정책을 과학적으로 설계·제한하여 신속하게 적용해야 한다. 코로나-19와 같은 감염병의 유행이 장기화된 상황에서는 국민이 합리적이고 자율적으로 수용할 수 있는 방역정책을 마련해야 한다. 이를 위해 여러 수준에서 유행을 예측하고 이를 완화하는 전략을 평가하는 기술과 관련된 다양한 데이터의 활용이 적극적으로 검토되어야 한다. 그러나 데이터(data)는 자칫 잘못하면 재앙(disaster)이 될 수 있기에, 이를 의미 있게 활용(diamond)하기 위해서는, 투명하되 과학적으로 직조할 수 있는 다양한 계산방법을 사용할 필요가 있겠다.

저자_ 김찬수(Chansoo Kim)

• 학력

서울대학교 경제학 박사
MIT Nuclear Science 박사과정 이수
MIT 응용물리-통계물리 석사
서울대학교 컴퓨터공학 학사

• 경력

現) 한국과학기술연구원 연구원



융합연구리뷰

Convergence Research Review 2020 September vol.6 no.9



02

에너지 하베스팅 기술

송현철(한국과학기술연구원 선임연구원)

I 서론

1. 에너지 하베스팅

우리 주변을 돌아보면 많은 에너지들이 사용되지 못하고 그냥 버려지고 있다. 태양으로부터 지구에 도달하는 태양 에너지를 비롯하여, 공기 대류에 의한 바람, 그 바람에 의한 파도, 달의 중력에 의한 조류, 방사성 물질의 방사성 감쇠와 화산 활동에 의한 지열, 외핵의 대류에 의한 지자기 등과 같이 지구상의 많은 에너지가 사용되거나 저장되지 못하고 버려지고 있다. 사실, 인류는 지구상에 존재하는 에너지의 0.001%에도 훨씬 못 미치는 에너지만 생활에 사용하고 있다. 햇빛, 파도, 조류, 바람, 지열, 지자기와 같은 대규모 에너지들 외에도 산업용 기계, 자동차, 빌딩, 다리, 보일러 등과 같이 우리 생활 주변에서도 진동, 열, 빛, 전자기파 같은 여러 형태의 소규모 미사용 에너지들이 많이 존재한다. 이처럼 우리 주변 환경에서 버려지는 소규모의 미사용 에너지를 수확 후 사용 가능한 형태의 전기 에너지로 변환하여 이용하는 것을 에너지 하베스팅(Energy harvesting) 기술이라고 한다.

최근, 에너지 하베스팅 기술은 반도체 기술 및 전자기술의 발전에 힘입어 전자기기들의 에너지 소모량이 크게 줄어들면서, 전자기기가 외부전원 없이 자가 발전하여 동작하는 자율전원이나 배터리의 교체 주기나 사용 시간을 늘려주는 보조전원으로써 크게 주목을 받고 있다. 특히, 에너지 하베스팅 기술은 전원 공급이 불가능한 곳이나 잦은 배터리 교체가 힘든 곳에서 큰 역할을 할 것으로 기대되고 있다.



2. 기계 에너지 하베스팅

빛, 진동, 열, 전자기파 등의 여러 종류의 에너지원 중에서, 기계 에너지는 산업용 기계, 운송 시스템, 가전제품 및 인간의 움직임 등과 같이 우리 주변에 흔히 존재하고, 다른 에너지들에 비해 에너지 밀도가 비교적 크고, 효율이 좋다는 장점을 가지고 있다. 이러한 이유로 화력발전소나 원자력발전소에서는 증기를 발생시켜서 증기터빈을 돌려서 발전하는 것처럼 대부분의 대형 발전은 최종적으로 기계 에너지로부터 전기를 생산해 낸다. 기계 에너지 하베스팅은 태양전지와 달리 실내·외 환경 조건에 크게 영향을 받지 않으며, 산업현장이나 실외의 거칠고 먼지가 많은 가혹한 환경에서도 잘 작동 할 수 있다. 또한 열전 에너지 하베스팅에 비해 계절과 날씨에 영향을 비교적 적게 받으며, 에너지 변환 효율도 비교적 크다. 기계 에너지를 전기 에너지로 변환하는 방법에는 압전(Piezoelectric), 마찰전기(Triboelectric), 전자기 유도(Electromagnetic induction), 정전(Electrostatic) 등의 여러 가지 에너지 변환 메커니즘이 있으며, 에너지 하베스팅 규모와 응용 방법에 따라서 적합한 에너지 변환 메커니즘을 사용하게 된다.

그림 2. 기계 에너지 하베스팅

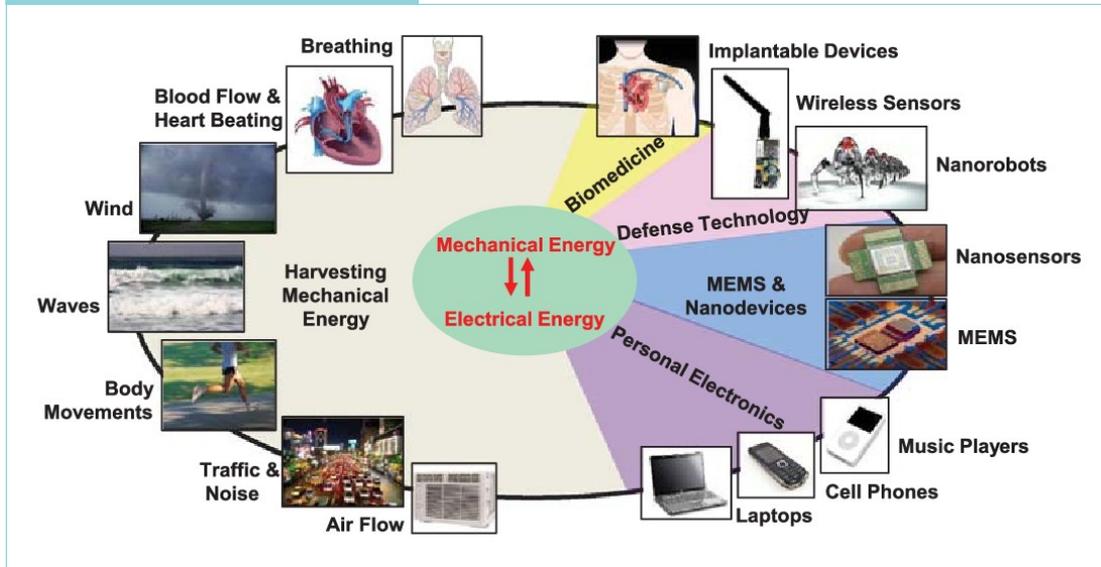


표 1. 주변 에너지원의 종류에 따른 효율 및 에너지 밀도

Energy Source	Characteristics	Efficiency	Harvested Power
Light	Outdoor Indoor	10~24%	100mW/cm ² 100μW/cm ²
Thermal	Human Industrial	~0.1% ~3%	60μW/cm ² ~1~10mW/cm ²
Motion and vibration	~Hz(Human) ~kHz(Machines)	25~50%	~4μW/cm ² ~800μW/cm ²
Radio frequency	GSM 900 MHz WiFi	~50%	0.1μW/cm ² 0.001 μW/cm ²

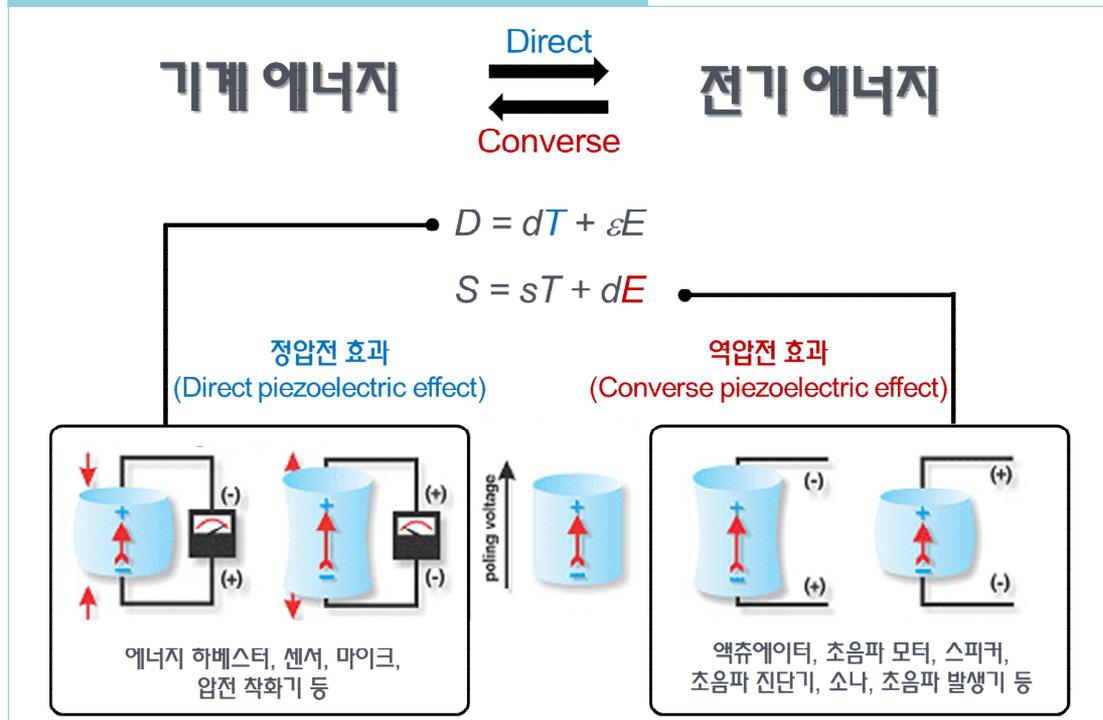
II 기계-전기 에너지 변환

1. 압전 기계-전기 에너지 변환

압전효과(Piezoelectric effect)는 분극이 있는 압전체를 누르거나 잡아당겨서 기계적 변형을 가하게 되면 전위차에 의해 전기가 발생되고, 반대로 압전체에 전계를 가하면 기계적 변형이 일어나는 현상을 의미한다. 첫 번째의 기계적 변형을 전기적 에너지로 바꿔주는 현상을 정압전 효과(Direct piezoelectric effect)라고 하며, 기계적 에너지를 직접적으로 전기 에너지로 바꿀 수 있기 때문에 에너지 하베스팅을 비롯하여 센서, 마이크, 압전 착화기 등에 많이 활용된다. 정압전 효과와 정반대로 전기적 에너지를 기계적 에너지로 바꿔주는 현상을 역압전 효과(Converse piezoelectric effect)라고 하고, 이 효과는 액추에이터(Actuator, 유체 에너지를 이용해 기계적인 작업을 하는 기기), 스피커, 초음파 진단기, 소나(Sonar, 초음파 탐지기) 등에 사용된다.

정압전 효과를 이용하여 주변의 기계 에너지를 전기 에너지로 변환하여 이용하는 압전 에너지 하베스팅(Piezoelectric energy harvesting) 기술은 다른 에너지 변환 메커니즘을 이용한 에너지 하베스팅 기술에 비해 상대적으로 높은 전기-기계 변환 효율, 높은 에너지 밀도, 온·습도 안정성 및 소자 구조의 단순성을 가지기 때문에 실용화 가능성이 가장 높으며, 최근까지 가장 많은 연구가 진행되고 있다. 그러나 압전 에너지 하베스터는 압전 세라믹 결정을 주로 사용하기 때문에, 지속적인 구동에 의한 파손 가능성이 있으므로 장기 안정성을 개선할 필요가 있다.

그림 3. 압전효과를 이용한 기계-전기 에너지 변환

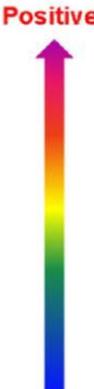


2. 마찰전기 기계-전기 에너지 변환

정전기 현상은 일반적으로 서로 다른 물질이 접촉하면서 접촉면의 전자의 이동으로 발생을 하며, 고체 상호 간에서만뿐만 아니라 고체와 액체 간, 액체 상호 간, 액체와 기체 간에도 발생한다. 정전기 현상 발견에 대한 기록은 고대 그리스의 철학자 탈레스(Thales)가 호박을 양피에 마찰해 정전기를 발생시킨 것이 시초였으며, 이러한 정전기 현상은 우리 생활 주변에서 빈번히 발생할 뿐만 아니라 자연 현상에서도 많이 볼 수 있는데, 그 대표적인 예가 구름에 의한 번개이다. 하지만 정전기 현상은 실생활이나 산업현장에서 폭발 또는 화재와 같은 사고를 일으키거나, 전자제품을 망가뜨리는 등 부정적인 요소로 여겨져서 이를 억제하려는 방향으로 연구가 진행되어왔다. 그러나, 2012년 미국 조지아 공과대학교(Georgia Institute of Technology)의 Zhong Lin Wang 교수 그룹이 마찰전기 효과(Triboelectric effect)를 이용하여 마찰전기 나노발전기(Triboelectric nanogenerator, TENG)를 개발하여 보고한 이후, 마찰전기를 이용한 에너지 하베스팅에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

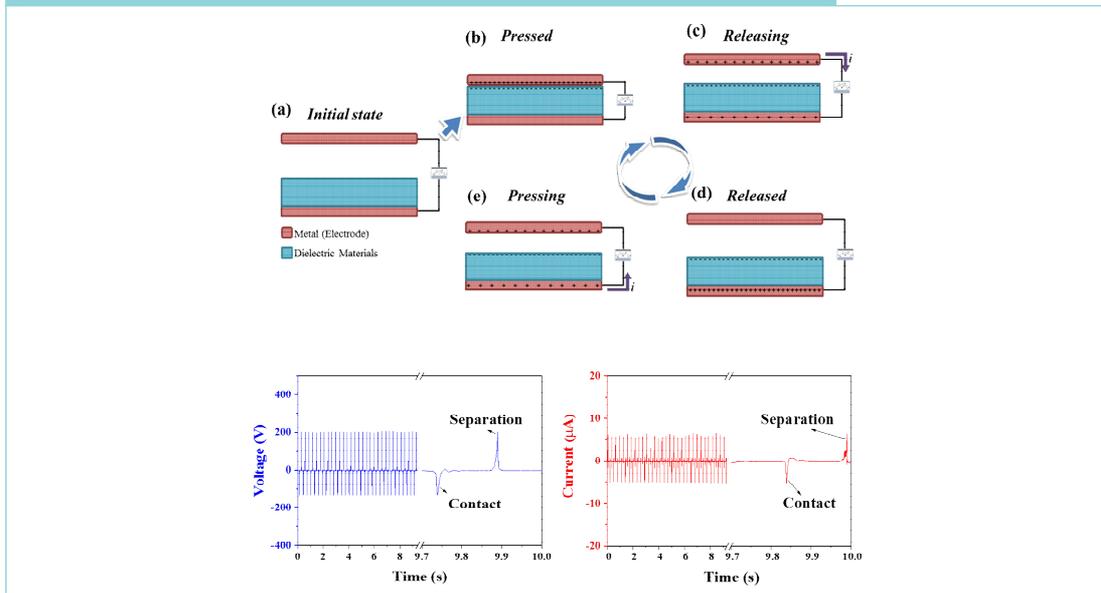
서로 다른 마찰전기 특성을 가지는 두 물질의 표면을 서로 마찰시키게 되면 어느 한쪽 물질의 전자가 다른 물질로 이동하게 되고, 이로 인해 물질은 각각 (+) 또는 (-) 전기를 띠게 된다. 이때 전자를 얻거나 잃는 경향에 따라 재료의 순위를 상대적으로 매길 수 있으며, 이를 나타낸 것이 <그림 4>의 "대전열(Triboelectric series)"이다. 따라서, 이 대전열로부터 두 물질을 마찰시킬 때 어느 쪽이 (+)가 될지, 어느 쪽이 (-)가 될지 미리 판단할 수 있다. 그리고 두 물질이 대전열에서 일반적으로 서로 멀수록 마찰 대전 효과가 커지며, 이는 전자 친화도(Electron affinity)로 수치화시킬 수 있으며, 두 물질의 전자 친화도 차이가 크면 클수록 마찰 대전 효과는 커진다.

그림 4. 대전열(Triboelectric series)

	Polyformaldehyde 1.3-1.4	(continued)	
	Etylcellulose	Polyester (Dacron)	
	Polyamide 11	Polyisobutylene	
	Polyamide 6-6	Polyuretane flexible sponge	
	Melanime formol	Polyethylene Terephthalate	
	Wool, knitted	Polyvinyl butyral	
	Silk, woven	Polychlorobutadiene	
	Aluminum	Natural rubber	
	paper	Polyacrilonitrile	
	Cotton, woven	Acrylonitrile-vinyl chloride	
	Steel	Polybisphenol carbonate	
	Wood	Polychloroether	
	Hard rubber	Polyvinylidene chloride (Saran)	
	Nickel, copper	Polystyrene	
	Sulfur	Polyethylene	
	Brass, silver	Polypropylene	
	Acetate, Rayon	Polyimide (Kapton)	
	Polymethyl methacrylate (Lucite)	Polyvinyl Chloride (PVC)	
	Polyvinyl alcohol	Polydimethylsiloxane (PDMS)	
	(continued)	Polytetrafluoroethylene (Teflon)	

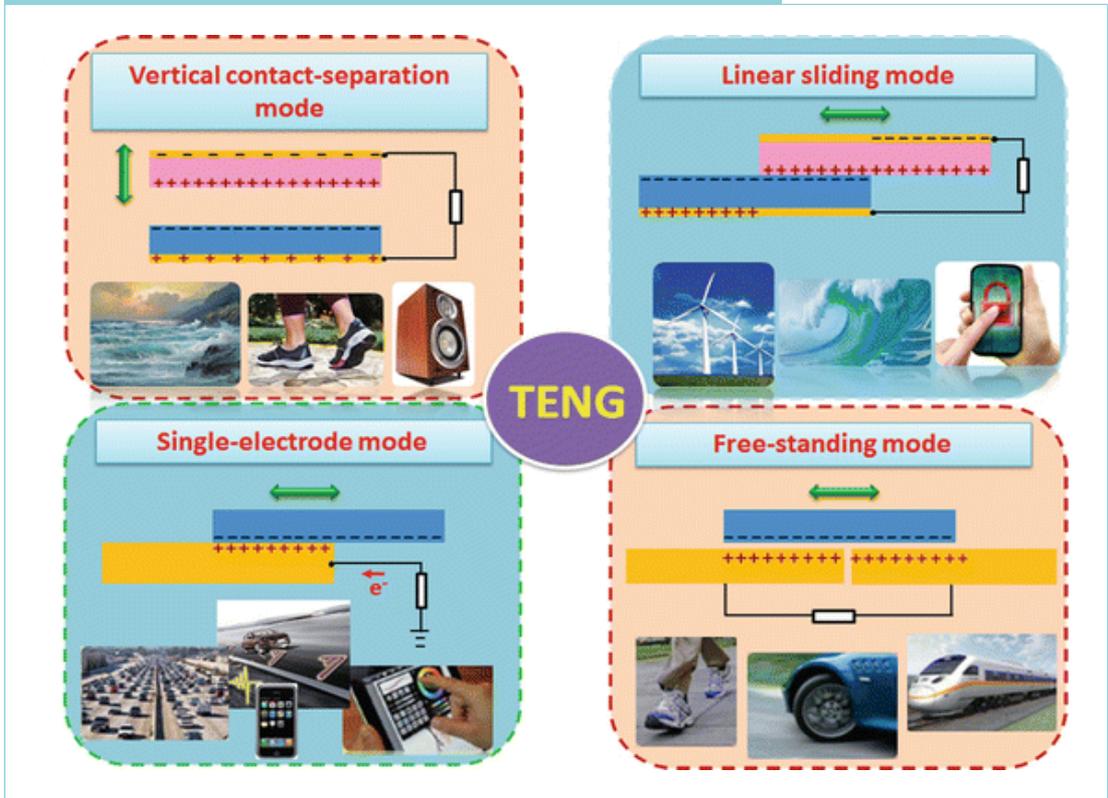
이러한 마찰전기의 특성을 이용하면, 기계 에너지를 전기 에너지로 변환하는 것이 가능하며, 이를 이용한 마찰전기 에너지 하베스터의 작동 원리는 <그림 5>에 나타나 있다. 먼저 두 개의 서로 다른 물질이 접촉하면 마찰 대전에 의해 표면이 대전되는 현상이 나타난다. 두 물질이 분리되게 되면 정전기 유도 현상에 의해 위·아래 전극에 보상 전하가 축적되고, 이로 인해 전하 균형이 맞을 때까지 외부 전극을 통해 전류가 흐르게 된다. 두 물질이 다시 가까워지면 축적되었던 보상 전하가 사라짐으로써 처음과는 반대 방향의 전류가 외부 전극을 통해 흐르게 되며, 반복되는 접촉 및 분리 과정을 통해 양 전극 간에 지속적으로 교류 전류가 생성되게 된다.

그림 5. 마찰전기 에너지 하베스터의 작동 원리와 출력전압 및 전류



<그림 6>에서와 같이 마찰전기 에너지 하베스터는 동작 원리에 따라서 크게 4가지의 동작 모드(mode)-수직 접촉-분리 모드(Vertical contact-separation mode), 선형 슬라이딩 모드(Linear sliding mode), 단일전극 모드(Single electrode mode), 프리 스탠딩 모드(Free standing mode)로 구분될 수 있으며, 에너지 하베스터의 응용처 및 에너지원의 종류에 따라 적합한 사용 모드를 사용하게 된다. 마찰전기 에너지 하베스터는 동작 원리가 간단하고 사용 가능한 물질의 폭이 넓어 가격이 저렴한 편이며, 비교적 큰 사이즈로 제작하기 쉽다는 장점이 있다. 그러나 정전기가 습도에 영향을 크게 받기 때문에 여름에는 출력이 떨어지며, 출력전압에 비해 출력전류가 낮은 단점이 있다.

그림 6. 마찰전기 에너지 하베스터의 동작모드에 따른 응용분야



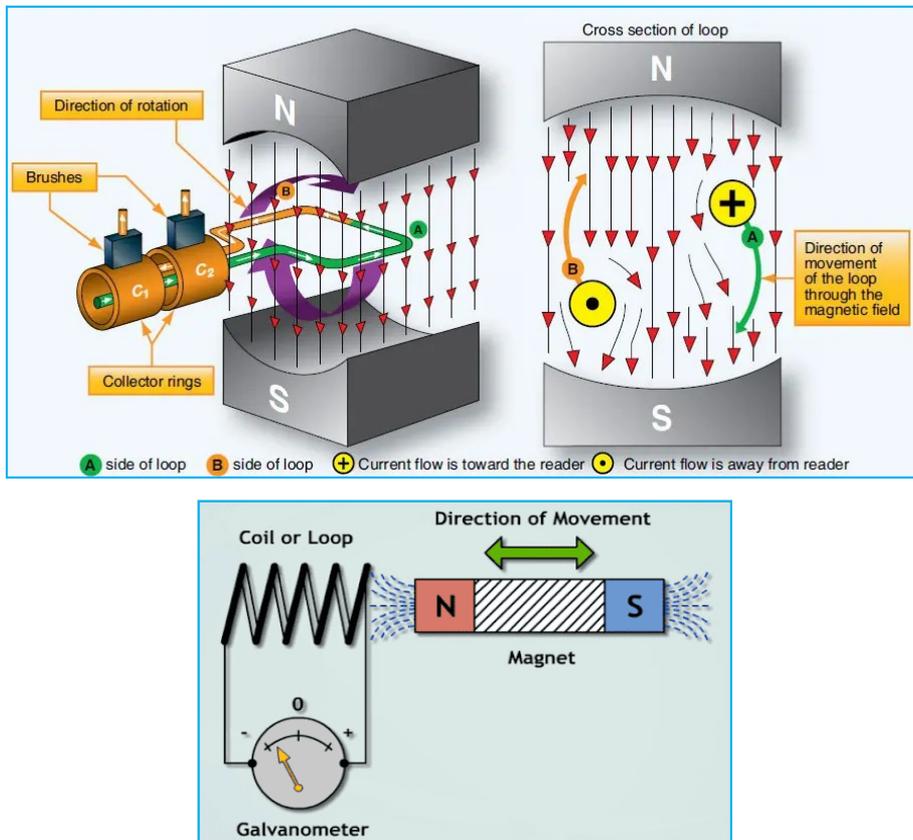
3. 전자기 기계-전기 에너지 변환

전자기유도효과(Electromagnetic induction effect)는 자기장이 변하는 공간에서 기전력이 발생하는 현상을 말하며, 패러데이(Faraday)가 처음으로 발견하여 수학적으로 증명하였다. 이 현상은 닫힌 회로에서 통과하는 자기 선속의 변화량은 곧 회로의 유도 기전력과 같다는 패러데이 법칙을 따르며 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$\varepsilon = - \frac{dF}{dt} = - \frac{d}{dt} \iint_s B \cdot da$$

ϵ 는 유도 기전력, F 는 자기 선속(Magnetic flux)을 나타낸다. <그림 7>과 같이 자기장 속에서 전선을 회전시키거나 자석을 솔레노이드 코일 안으로 움직임으로써 기전력을 발생시킬 수 있다. 대부분의 발전소는 높은 전류를 생성하기 위해서, 수증기로 증기터빈을 돌리거나 수력에 의한 수차를 돌려 생긴 기계 에너지를 전자기유도 현상을 이용하여 전기를 생산한다. 대형발전에서는 전자기유도 효과를 이용하는 것이 효율적이지만, 발전기의 구조가 복잡하여 소형화하는데 어려움이 있으며, 저주파 진동이나 미량의 기계 에너지로부터 발전하는 데는 에너지 변환 효율이 크게 떨어진다. 그러나 높은 전류를 생성시킬 수 있고 장기 안정성이 좋으므로 소형 풍력발전기나 소형 수력발전기와 같이 소규모의 회전운동으로부터 전기 에너지를 생성하는 데는 유용하게 활용 가능할 것으로 판단된다.

그림 7. 전자기 유도 발전기의 동작원리



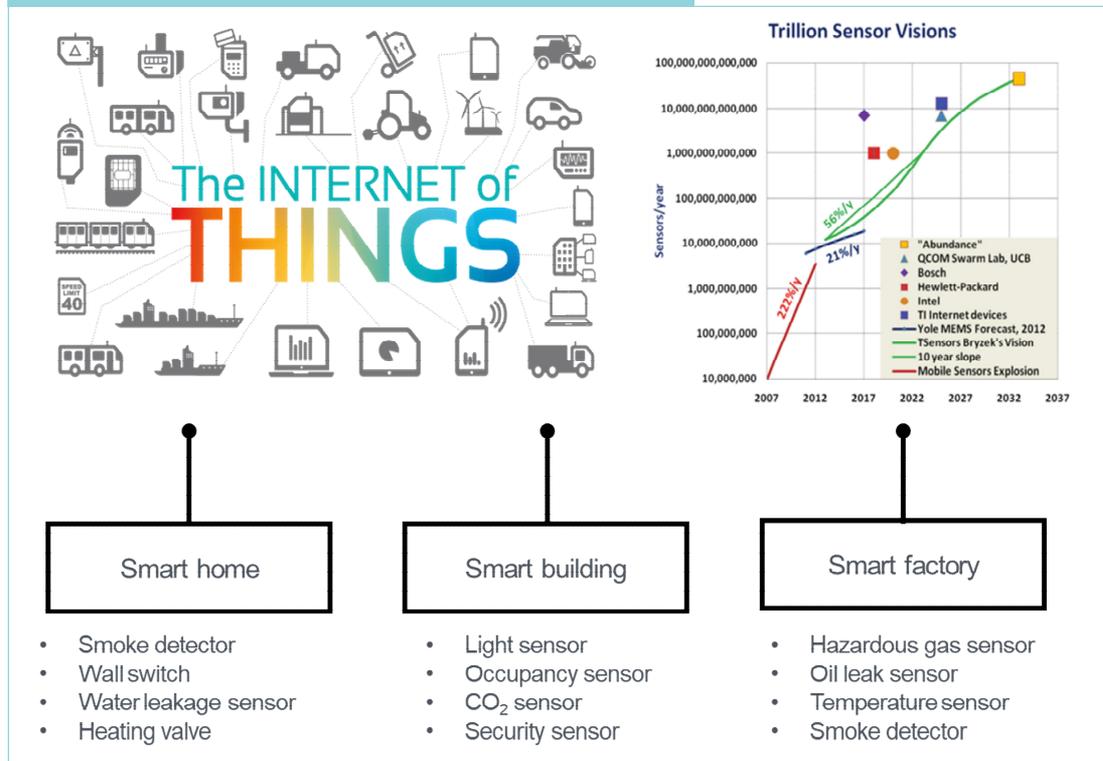
III IoT 자율전원용 에너지 하베스팅 기술

1. 사물인터넷(IoT)에서 에너지 하베스팅 기술의 필요성

최근, 에너지 하베스팅 기술은 반도체 기술 및 전자기술의 발전에 힘입어 전자기기들의 에너지 소모량이 줄어들면서 소형 전자기기들의 자율전원으로써 크게 주목받고 있다. 특히, 4차 산업혁명 시대를 맞이하여, 모든 사물들이 인터넷으로 연결되는 사물인터넷(Internet of Things, IoT) 기술이 대두되면서, 에너지 하베스팅 기술이 더욱 부각되고 있다. IoT 기술의 저변 확대를 가로막는 가장 큰 장애물로, IoT를 구성하는 핵심 요소인 센서 및 무선 송수신 장치들이 전원선이나 배터리로부터 자유롭지 못하다는 것이다. 배터리는 지속적인 사용을 위해서 충전을 하거나 교체하는 작업이 필요하며, 전원선 연결을 위해서는 복잡한 배선 작업이 필요하다. 원거리에서 구조물을 모니터링하는 센서(Health monitoring sensor) 또는 지리적으로 접근하기 어려운 곳에 설치된 온습도 센서의 배터리를 충전하거나 교체하는 작업 또는 전원선을 연결하는 일은 시간과 비용이 많이 들고, 경우에 따라서는 이러한 작업이 불가능할 수도 있다. 해저 깊은 곳, 넓은 사막 지역, 원자로 내부, 높은 건물의 외벽, 극지방 등과 같이 위험하거나 환경이 열악하고 설치 지역이 광활하여 사람의 접근이 힘든 곳에서 배터리를 교체하거나 전원선을 연결하는 일은 거의 불가능에 가깝다. 또한 수백, 수천 개의 센서가 설치된 무선 센서 네트워크(Wireless Sensor Network, WSN) 환경의 도심 지역에서도 시간과 비용을 고려했을 때, 이러한 작업들은 굉장히 비효율적이다. 그러므로 대규모 센서 네트워크 환경이나 사람의 접근이 힘든 곳에서 안정적인 전원을 공급하기 위해서는, 해당 위치에서 사용 가능한 모든 형태의 에너지원들을 전기 에너지로 변환할 수 있는 자가 발전기(On-site generators)의 개발이 필요하다.

최근 저전력 초고밀도 집적회로(Very-Large Scale Integration) 기술의 급속한 발전으로 인해 초저전력 집적회로 및 센서의 구현이 가능하게 되었으며, 이러한 소자들은 불과 10~100 μ W의 전력으로 구동이 가능하다. 이러한 전자 소자들의 저전력화는 에너지 하베스팅 기술을 이용한 온 보드 전원(On-board power source)의 실현 가능성을 높여주었으며, 복잡한 배선이나 배터리가 필요 없는 자율전원 센서(Standalone sensor) 및 네트워크 시스템의 토대를 마련하였다고 할 수 있다.

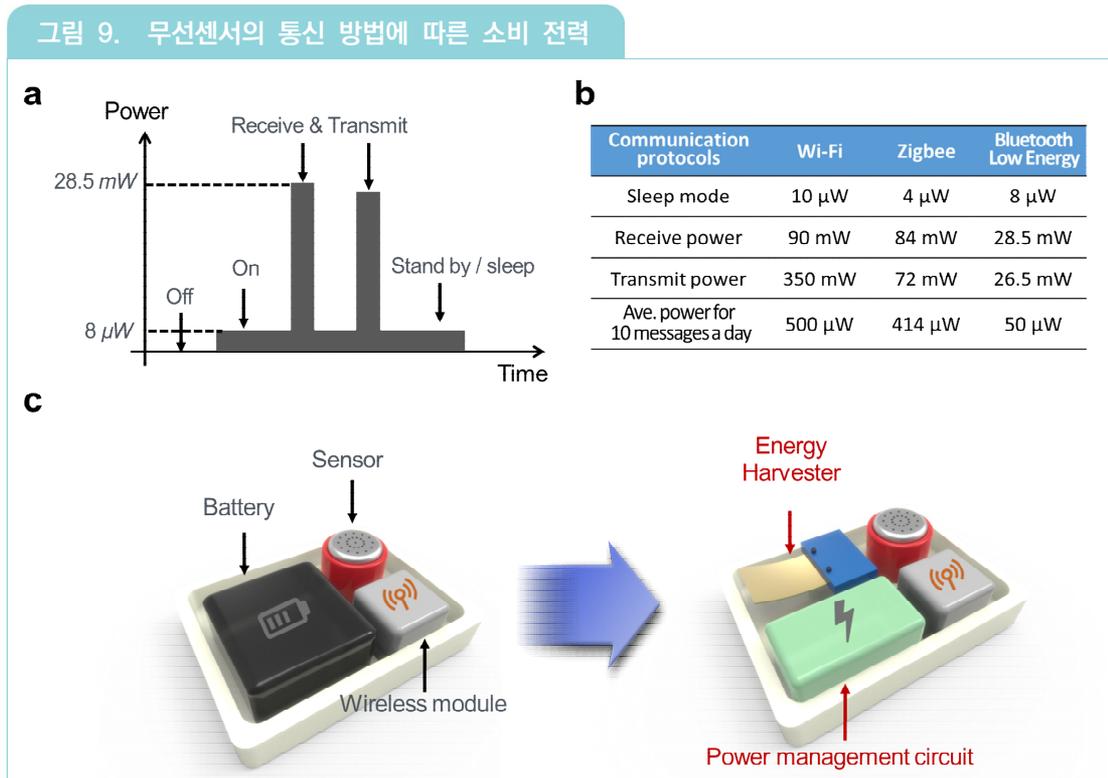
그림 8. 사물인터넷(IoT) 및 전 세계 연간 센서 사용량 예측



2. IoT 센서의 에너지 소모량

최근 센서의 전력 소모량이 수 nW 수준으로 지속적으로 감소하고 있지만, IoT 센서에서 전력 소모량의 대부분을 무선 통신 장치가 차지하고 있기 때문에, IoT 센서를 구동하기 위한 에너지 수준은 여전히 에너지 하베스터의 출력 부담으로 작용하고 있다. <그림 9(a)>는 일반적인 블루투스 저에너지(Bluetooth Low Energy, BLE) 무선 센서의 시간 경과에 따른 전력 소비를 보여준다. 무선 센서는 대부분의 시간을 절전모드에서 수 마이크로 와트의 전력만 소비하고, 신호를 송수신하는 짧은 시간 동안만 많은 에너지를 소비한다. 대부분의 응용에서는 데이터를 지속적으로 전송할 필요가 없기 때문에 평균 전력 소비는 상당히 낮을 수 있다. <그림 9(b)>의 표는 가장 일반적으로 사용되는 세 가지 무선 통신 프로토콜, 즉 WiFi, ZigBee 및 블루투스 저에너지의 전력 소모량을 비교하여 보여준다. 평균 에너지 소비는 통신 거리에 따라 다르겠지만, 데이터 통신이 하루에 10번으로만 제한된다면, 무선 통신 방법에 상관없이 평균 전력 소비는 500μW 미만 밖에 되지 않는다. 무선

데이터 전송 소비 전력 외에도 센서 및 집적회로(Integrated Circuit, IC)의 전력 소비를 포함시키더라도 총 소비 전력은 수백 μW 에서 1mW 미만에 불과하다. 따라서 에너지 하베스터를 이용하여 꾸준히 1mW 이상의 에너지만 공급할 수 있다면, 복잡한 전원선 연결이나 주기적인 배터리 교체가 필요없는 자율전원 IoT 센서 네트워크를 구현할 수 있다.



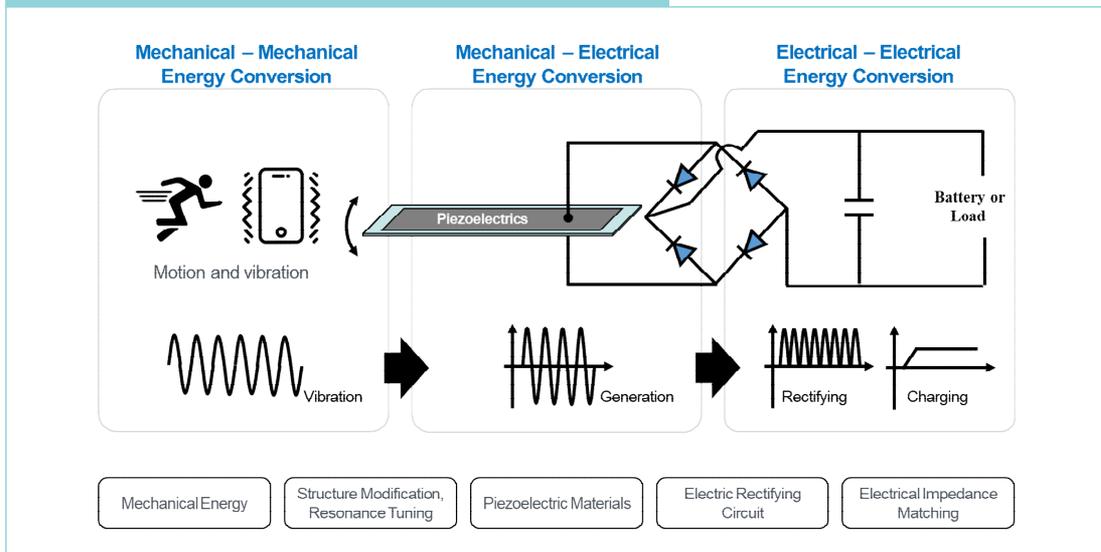
출처: Wiley 저널

3. 진동형 압전 에너지 하베스터의 3단계 에너지 변환

IoT 센서에 안정적으로 전원을 공급하기 위해서는 무엇보다도 지속적이고 규칙적인 진동을 이용하는 것이 필요하며, 이러한 규칙적인 진동으로부터 에너지를 수확하는데 가장 효율적인 방법은 압전 에너지 하베스팅이다. 압전 에너지 하베스터는 소자 구조가 간단하며 작은 사이즈에서도 높은 에너지 변환 효율을 나타내기 때문에 IoT 센서 자율전원용 에너지 하베스터로써 가장 많은 연구가 이루어지고 있다.

압전 에너지 하베스터에서는 <그림 10>의 에너지 흐름도에서 보는 바와 같이, 크게 세개의 단계에 걸쳐 에너지 변환이 발생한다. 각각의 에너지 변환 단계에서는 불가피하게 에너지 손실이 발생하며, 주변의 제한된 에너지원으로부터 최대한의 전기 에너지를 얻기 위해서는, 각 단계의 에너지 변환 효율을 증가시켜야 한다. 첫 번째 에너지 변환 단계는 기계 에너지에서 기계 에너지로의 변환이며, 에너지 하베스터가 주변의 기계 에너지를 얼마나 효율적으로 흡수할 수 있느냐와 관련이 있다. 이 단계에서 에너지 변환 효율을 높이기 위해서는, 에너지 하베스터의 고유진동수를 조절하여 공진을 유도하는 등의 하베스터 구조를 주변 진동에 맞춰 최적화하는 작업이 필요하다. 두 번째는 기계-전기 에너지 변환 단계로 에너지 변환 재료인 압전재료와 밀접한 관련이 있으며, 이 단계의 에너지 변환 효율을 향상시키기 위해서는 압전재료의 에너지 하베스팅과 관련된 물성을 향상시켜야 한다. 그리고 마지막은 전기-전기 에너지 변환 단계로, 압전재료로부터 생성된 교류 형태의 전기 에너지를 배터리에 충전하거나 소자에 이용하기 위해 직류 형태의 전기 에너지로 변환하는 것이다. 이를 위해서 정류회로나 DC-DC 컨버터(직류를 직류로 변환하는 장치) 등의 전기회로가 사용되며, 여기에서 에너지 손실이 발생하게 된다. 이 단계에서 에너지 변환 효율을 높이기 위해서는 저에너지 손실 전기회로의 개발이 필요하다. 이와 같이 고효율의 압전 에너지 하베스터를 개발하기 위해서는 단순한 기구적 관점의 소자 개발에서 벗어나 기계, 재료, 회로의 다학제적 접근을 통한 융합연구가 필요하다.

그림 10. 압전 에너지 하베스터에서의 에너지 흐름도

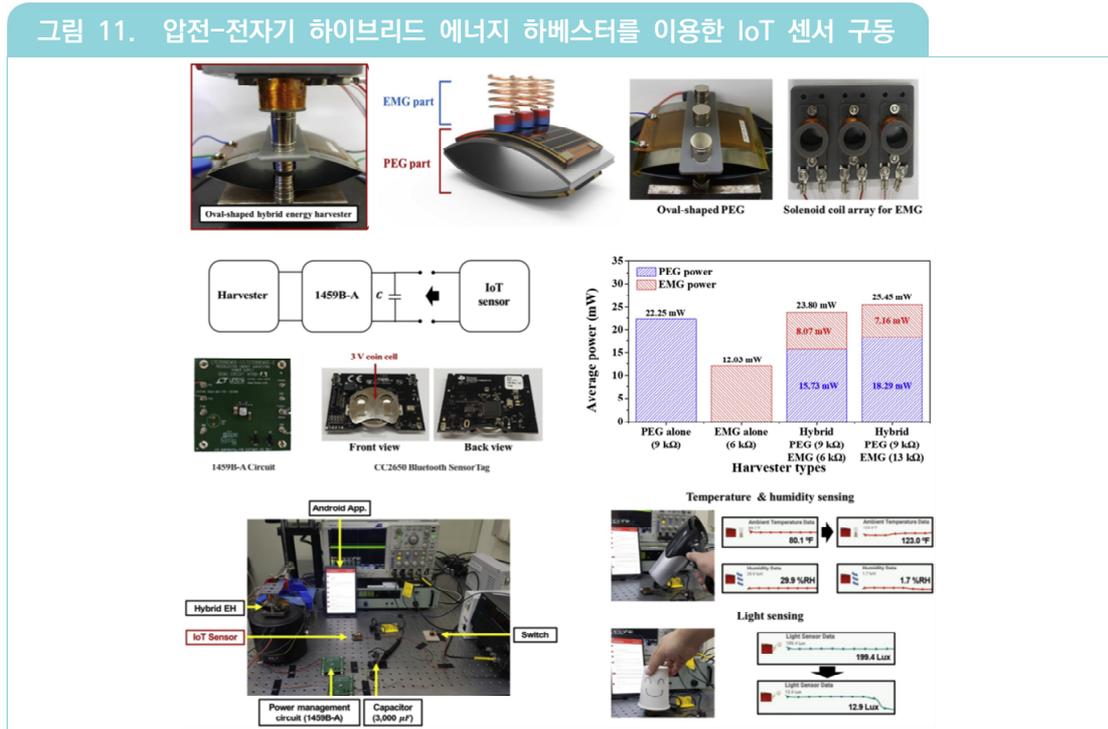


출처: Wiley 저널

4. IoT 센서 전원용 에너지 하베스터

4.1. 압전-전자기 하이브리드 하베스터

한국과학기술연구원(KIST)에서는 <그림 11>에서와 같이 Oval 형태의 압전 에너지 하베스터와 전자기 에너지 하베스터를 결합한 하이브리드 에너지 하베스터를 개발하였다. 0.5 중력가속도의 60Hz 진동에서 압전 에너지 하베스터만을 이용하여 20mW이상의 전력을 안정적으로 발전할 수 있으며, 전자기 에너지 하베스터와 하이브리드 하였을 경우 최대 25.45mW의 전력을 발생시킬 수 있었다. Linear technology의 1459B 전력관리 회로(AC-DC 컨버터)를 연결하여 3.3V의 연속적인 전압을 출력할 수 있었으며, 3V 코인 전지를 대체하여 블루투스 IoT 센서를 성공적으로 동작시켰다. 블루투스 IoT 센서는 20mW의 최대 피크 파워 및 9.5mW의 평균 전력을 필요로 하였으며, 하이브리드 에너지 하베스터를 이용하여 온도, 습도, 광, 위치 등을 감지할 수 있는 다중센서를 성공적으로 동작시키고, 블루투스를 이용하여 개인용 정보단말기(Personal Digital Assistants, PDA)로 감지 정보를 안정적으로 송수신할 수 있었다.



출처: Elsevier 저널

4.2. Perpetuum의 에너지 하베스터

영국의 Perpetuum는 <그림 12>에 나타난 바와 같이 여러 가지 진동에 사용 가능한 전자기 형태의 IoT 센서용 에너지 하베스터를 개발하여 상품화하였다. Perpetuum의 에너지 하베스터는 최대 27.5mW까지 발전할 수 있으며, $-40^{\circ}\text{C}\sim+85^{\circ}\text{C}$ 의 사용 가능한 온도 범위에서 안정적 구동 주파수(25, 30, 50, 60, 100, 120Hz) 및 대역폭을 가지고 있다. 또한 밀폐된 스테인리스강 케이스를 포함하여 고신뢰성 디자인을 가지고 있기 때문에, 위험 지역에서도 사용할 수 있도록 ATEX, IECEx, FM, cFM 등 유럽의 여러 방폭 인증을 받았다. 특히, Perpetuum은 스웨덴 국영 열차 운영사인 SJ와 고속기차의 상태를 무선으로 모니터링하여 솔루션을 제공하는 10년 계약을 성사시켰다. 에너지 하베스팅 IoT 진동 센서를 이용하여 열차의 차량, 베어링, 휠 뿐만 아니라 선로의 상태를 무선으로 실시간 점검하여 유지보수가 제때에 이루어질 수 있도록 하는 서비스를 제공한다. Perpetuum은 혹독한 스칸디나비아 환경에서 80개의 기차 바퀴에 대한 18개월 성능시험 테스트를 성공적으로 통과한 후에야 계약을 체결할 수 있었으며, 10년 서비스 계약을 체결하게 되었다는 것은 에너지 하베스터가 IoT 센서의 자율전원으로써 안정성과 상품성을 성공적으로 인정받았음을 의미한다.

그림 12. (상)Perpetuum의 전자기 진동 에너지 하베스터, (중)에너지 하베스터가 기차 바퀴휠에 장착된 모습, (하)휠 상태를 모니터링한 데이터



출처: Perpetuum

4.3. 8Power의 에너지 하베스터

8Power는 영국 캠브리지 대학 기반의 스타트업 기업이며, 에너지 하베스터를 이용하여 8(무한대)의 파워를 제공하겠다는 이념으로 세워졌다. 8Power는 진동 기반의 에너지 하베스터를 주로 개발하고 있으며, 파라메트릭 공진(Parametric Resonance)을 이용하여 작동 주파수 대역을 넓힘으로써 비슷한 크기의 장치에 비해 3~5배의 높은 성능을 얻을 수 있다고 한다. 이를 통해 다른 에너지 하베스터에 비해 좀 더 고출력의 센서를 구동하거나 더 많은 수의 데이터를 더욱 빈번하게 송수신할 수 있다. 8Power의 IP67 모델은 IoT 센서용 에너지 하베스터로 진동 에너지 하베스터를 기본으로 태양 전지판을 선택적으로 포함시킬 수 있다. Track 100 GPS 트래커는 트럭, 기차 또는 기타 차량에서 발생하는 진동을 이용하여 구동되며 부착하는 것만으로 배터리 없이 위치를 추적할 수 있다. 운송 산업의 진동을 활용하는 것 외에도 8Power 기술은 인프라(교량, 제방, 송전선) 및 기계장치(고출력 모터 및 회전 장비)의 진동에서 전력을 생성할 수 있으며, 이 기술은 스코틀랜드의 다리에 설치하여 IoT 센서를 성공적으로 구동함으로써, 실험적 검증 및 필드 테스트를 이미 마쳤다.



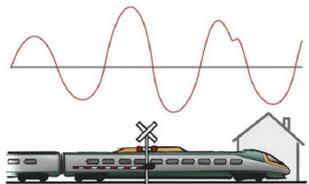
출처: 8Power

4.4. Kinergizer의 에너지 하베스터

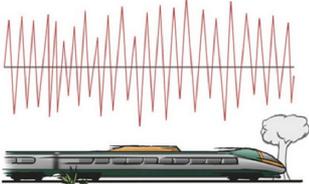
Kinergizer는 네덜란드 기반의 회사로 2012년도에 세워졌으며, 네덜란드의 델프트 공과대학교(Delft University of Technology)와 긴밀한 기술적 협력 관계를 맺고 있다. 기존의 진동 에너지 하베스터는 특정 진동 주파수 범위에서만 잘 작동하는데 비해 Kinergizer의 에너지 하베스터 특허 기술은 매우 낮은 주파수를 포함하여 훨씬 더 넓은 주파수 범위에서 동작이 가능한 것이 특징이다. 뿐만 아니라, Kinergizer의 에너지 하베스터는 자동차나 기차 엔진의 진동처럼 주파수가 지속적으로 변하는 진동 환경에서도 동작이 가능하기 때문에 결과적으로, 훨씬 다양한 환경에 적용이 가능하다. 또한, Kinergizer의 하베스터는 효율적인 전원 관리 시스템을 포함하고 있으며, 이를 통해 훨씬 안정적인 출력을 제공할 수 있다.

그림 14. Kinergizer의 진동형 에너지 하베스터 제품 및 실제 설치 사진

Vibrations at low speed



Vibrations at high speed





DICE

Ideal for size sensible applications

Size: 42 x 33 x 26 mm
Weight: 75 gram
Power: 0.5 - 2.5 mW
*Depending on vibration level



HIPER-D

All rounder high performer

Size: ø35-75 mm
Weight: 90 gram
Power: 1-5 mW
*Depending on vibration level



SILVERSTONE

Ideal for railway applications

Size: 70 x 60 x 30 mm
Weight: 250 gram
Power: 1.5 - 15 mW
*Depending on vibration level




출처: Kinergizer

4.5. Star Micronics의 비콘(beacon) 에너지 하베스터

일본 프린터 회사인 Star Micronics는 IoT 적용을 위해 사람의 움직임으로부터 발전할 수 있는 진동형 에너지 하베스팅 비콘(beacon)을 개발하였다. 진동 에너지 하베스팅 비콘은 걷기 동작으로부터 에너지를 수확하도록 특별히 설계되었으며, 사람이 걸을 때 무게 중심 이동으로 발생된 진동으로부터 코일 주위에 있는 자석을 움직여, 전자기 유도 현상으로 전기를 생성한다. <그림 15>에서처럼 ID 태그 형태의 에너지 하베스팅 비콘을 개발하였으며, 태그를 직접 접촉하지 않고도 신분을 확인하거나 건물에서 사람의 위치를 추적하는 것이 가능하며, 또한 자동으로 전등을 켜거나 공조기를 동작시키는 것이 가능하다. 이 모든 것이 배터리 충전 없이 걷는 동작만으로 비콘에 완전히 전원을 공급할 수 있다. 에너지 하베스팅 비콘의 또 다른 응용으로는 쇼핑 카트 휠에 내장하는 것이다. 바퀴의 구르는 동작을 이용하여 비콘에 전력을 공급함으로써 카트 위치 정보 확인하거나 소비자에게 위치에 따른 여러 가지 상호작용 서비스를 제공할 수 있다.



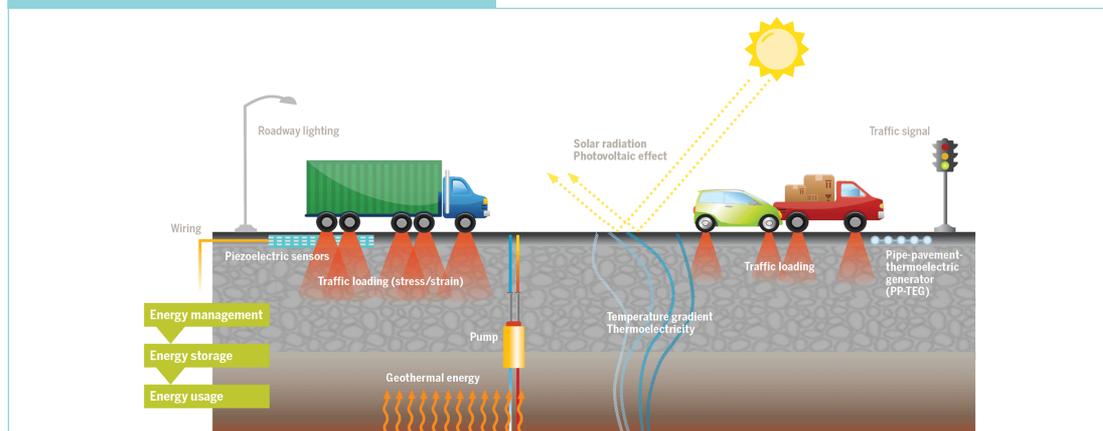
출처: Star Micronics

IV 도로 에너지 하베스팅

1. 도로 에너지 하베스팅

도로는 지역 사회를 연결하고 사람이나 물동량이 이동하는데 중요한 역할을 하는, 주요 도시 인프라 중 하나이다. 전통적으로, 도로는 차량이나 사람이 지나갈 수 있는 구조적인 플랫폼으로만 인식되어 왔다. 그러나 현대에 이르러서는 가로등, 과속방지 카메라, 톨게이트 등과 같이 전력 소모가 필요한 장치들이 많이 설치되어 있으며, 미래의 스마트 도로에는 온도, 습도, 강우량, 충격, 결빙 센서를 비롯하여 자동 난방 및 냉각 장치 등 여러 가지 복잡한 전자장치들이 설치되어 도로에 필요한 전기 에너지가 많이 증가할 것으로 예상되고 있다. 도로의 표면은 하루 종일 햇볕에 노출되어 태양 에너지를 받아 온도 구배를 발생시키거나, 자동차가 지나갈 때마다 기계적 진동 에너지를 받게 된다. 도로는 빛, 열, 진동같이 여러 가지 에너지들에 지속적으로 노출되어 있지만, 대부분의 에너지는 사용되지 못하고 그냥 버려지고 있다. 따라서 이러한 도로에서 버려지는 에너지들을 수확하여 전기 에너지로 변환할 수 있다면, 다양한 용도로 사용할 수 있을 것이다. <그림 16>은 도로에 적용할 수 있는, 사용 가능한 모든 에너지에 대한 에너지 하베스팅 기술을 보여준다.

그림 16. 도로 에너지 하베스팅 기술



출처: Rutgers University

〈표 2〉는 도로 에너지 하베스팅 기술별 에너지 비용 단가(Levelized Cost Of Electricity, LCOE)를 비교해서 보여주고 있다. 태양전지의 에너지 발전 단가 비용이 가장 낮고, TRL 레벨이 9로 가장 높은 것을 알 수 있다. 그러나 태양전지는 소자 위로 자동차나 사람이 지속적으로 지나갈 경우 내구성에 쉽게 문제가 생길 수 있으며, 표면의 먼지나 스크래치에 의해서 효율이 크게 떨어질 가능성이 크다. 또한 열전발전은 지속적인 온도 구배가 필요하고, 대면적에서는 단가가 크게 올라갈 가능성이 있기 때문에 그다지 효과적이지 못하다. 자동차나 사람의 무게 이동에 의한 기계적 에너지 하베스팅은 에너지 비용 단가 높고 TRL 레벨이 4로 낮은 편인데도 불구하고, 활용 가능성이 높기 때문에 최근 많은 주목을 받고 있다. 이번 장에서는 자동차 도로 및 보도블록에 발생하는 기계적 에너지를 이용한 최신 에너지 하베스팅 기술에 대해 알아본다.

표 2. 도로 에너지 하베스팅 기술별 에너지 비용 단가(Levelized Cost Of Electricity, LCOE) 비교

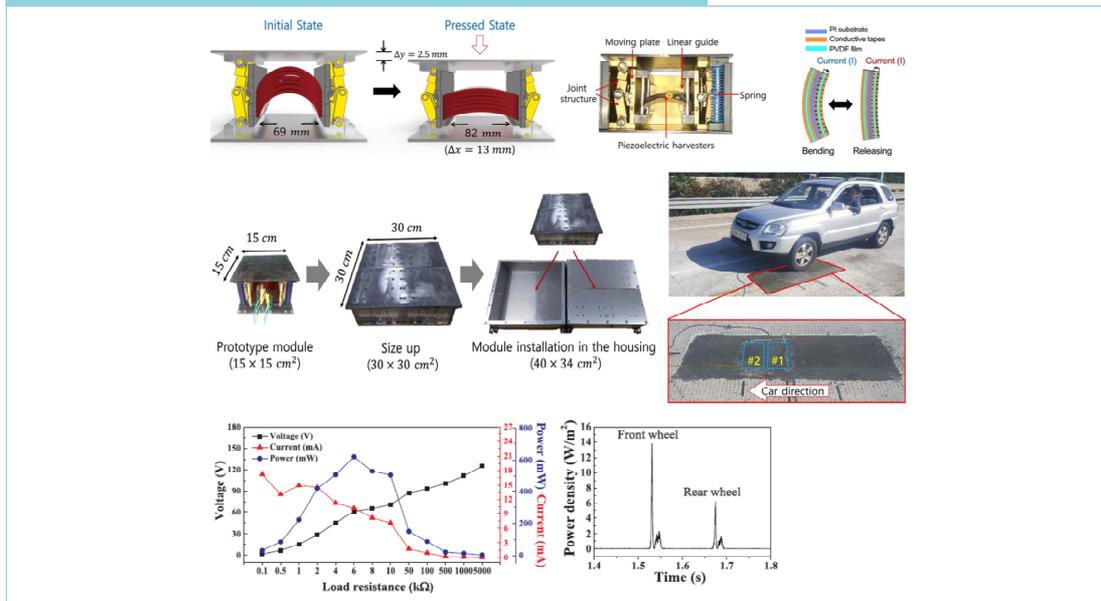
Technology	System configuration	Energy output	Cost	LCOE (\$/kWh)	Technology readiness level(TRL)
Photovoltaic	Pavement system supported by solar panels	1781MW h /lane-mile	@4.4million /lane-mile	0.45	9
Solar collectors	SERSO system in swiss with piping under pavement	588.634kW /lane-mile	9.812million /lane-mile	4.21	4
Thermoelectric	Two-TEG prototype(64mm x 64mm)	0.748kW /lane-mile	12.781million /lane-mile	95.74	3
Geothermal	Heat pipes with geothermal water and steam of Class III(maximum)	4447.270kW /lane-mile	\$15.2million /lane-mile	0.1561	9
Electromagnetic	Vibration based system installed on bridge cables	35.67mW per system	\$3000~5000 per unit	278.95	4
Piezoelectric	Cymbal shape under typical truck loading	188kWh /lane-mile	\$7.5million /lane-mile	106.387	4

2. 자동차 도로 에너지 하베스팅

2.1. 압전 폴리머 도로 에너지 하베스터

한국과학기술연구원(KIST)에서는 이소불화비닐(Poly Vinylidienfluoride, PVDF) 압전 폴리머를 이용한 도로용 압전 에너지 하베스터를 개발했다. 일반적으로 압전 세라믹은 압전 폴리머에 비해 특성값이 높지만, 취성이 높아 작은 충격에도 잘 깨지는 특성이 있다. 이에 한국과학기술연구원에서는 도로용 에너지 하베스터의 내구성을 향상시키기 위해 압전 세라믹 대신 PVDF 압전 폴리머를 사용하여 도로용 압전 에너지 하베스터를 개발하였다. 또한, 압전 폴리머의 낮은 압전 특성을 보상하기 위해, <그림 17>에서와 같이 압전 폴리머를 여러 장 겹쳐서 쌓고 변위를 증가시킬 수 있는 기구를 도입하여 기존 압전 세라믹에 비해 출력을 5배 이상 높이고, 1천만 회 이상의 충격에도 기능이 저하되지 않도록 만들었다. 그리고 자동차가 지나갈 때 충격을 느끼지 않도록 변위를 차선 페인트 두께 정도인 2.5mm로 제한한 결과, 30×30cm² 크기의 하베스터에서 생산할 수 있는 최대 전력은 620.2mW였다. 또한, 전기 에너지를 수확함과 동시에 추가적인 장치 없이 앞바퀴와 뒷바퀴의 전기신호 간격으로부터 속도도 감지할 수 있었다.

그림 17. 압전 폴리머를 이용한 도로용 에너지 하베스터



출처: KIST

2.2. Innowattech의 도로 에너지 하베스터

이스라엘 기업 Innowattech는 실제 도로 및 철도 밑에 압전 패널 형태의 에너지 하베스터를 깔고 처음으로 도로형 에너지 하베스터를 실증하였다. 압전을 이용한 기계 에너지 하베스팅뿐만 아니라 도로의 열에너지를 전기로 변환하는 복합장치를 개발해 발전 효율을 높였다. 1km당 500kW의 에너지를 발전할 수 있으며, 편도 2차선 도로 1km에 차량 600여 대가 지나가면 250가구에 공급할 수 있는 전기를 생산할 수 있다.

그림 18. 도로 및 철도 에너지 하베스터

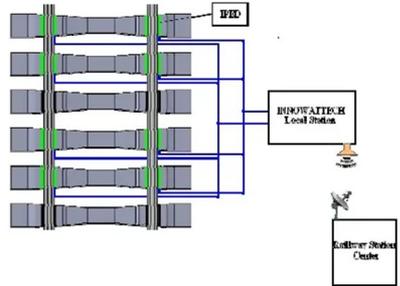
Innowattech – 500 kW per km

- Piezoelectric panels for roadways and train tracks
- Generates electricity from passing vehicles
- Game changing invention ready for installation
- Should be developed in this country as well
- Advocated by IRI in *Future Energy Annual 2012*



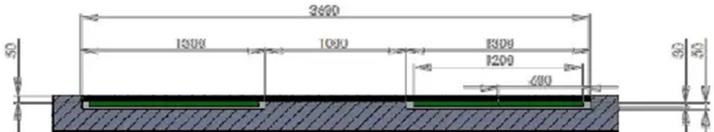


Piezo panels ready for insert









출처: Innowattech

2.3. 에너지 하베스팅 과속 방지턱

Underground Power SRL는 2011년 밀라노 공과대학교(Politecnico di Milano)와 기술협력으로 세워진 이탈리아 도로 에너지 하베스팅 전문 기업이다. 특히, 주목할 만한 것은 LYBRA라는 스마트 “감속기(Speed Absorber)”를 개발한 것이다. 톨게이트이나 건널목 앞과 같이 차량의 감속이 필요한 곳의 아스팔트 밑에 설치하여 과속 방지턱처럼 차량의 감속을 유도하고 그 때 줄어드는 운동에너지를 전기 에너지로 변환한다. 생성된 전기 에너지는 신호등이나 가로등을 동작하는데 필요한 보조전원으로 사용할 수 있다. 또한 Underground Power는 <그림 19>에서와 같이 TRYGEN이라는 안전 유도등을 개발하였다. 이는 인도나 자전거 도로 밑에 설치하여 사람의 발걸음이나 자전거가 지나갈 때의 무게를 이용하여, 배터리나 전원선 연결 없이 전구를 점등하여 가로등이 없는 도로의 안전 유도등으로 사용할 수 있다.

그림 19. LYBRA(속도 감속기 에너지 하베스터) 및 TRYGEN(스텝 에너지 하베스터)



출처: Underground Power

3. 보도블럭 에너지 하베스팅

3.1. Pavegen의 보도블럭 에너지 하베스터

영국 기업 Pavegen은 가장 많이 알려진 에너지 하베스팅 기업으로, 사람이 많이 다니는 인도에 보도블럭 형태의 발전패드를 설치하는 사업을 벌이고 있다. 파리 마라톤과 2012년 런던올림픽 등 스포츠 대회에서 로드테스트를 거친 이후 영국의 12개 학교, 미국 뉴욕의 일부 학교, 남아공 거리 등에 발전패드를 설치하여 전기를 생산하고 있다. 또한, Pavegen은 브라질 리우데자네이루의 빈민가에 축구장을 건설, 사람들이 축구장을 뛰어나며 발생하는 진동 에너지를 압전 소자를 이용해 전기를 발생시켜 6개의 발광 다이오드(Light Emitting Diode, LED) 조명 전력으로 전환해 사용하고 있다. Pavegen의 발전패드는 초기에는 압전을 이용한 형태를 사용하였으나, 최근에는 <그림 20>에서와 같이 삼각형 블록형태의 전자기유도 발전기로 변경하여 사업을 진행하고 있다.



출처: Pavegen

3.2. 지하철역 에너지 하베스터

시내 중심가의 지하철역은 하루에도 수십만 명의 사람들이 지나다닌다. 이러한 유동인구가 많은 지하철역에 에너지 하베스터를 설치하여, 사람들이 지나다니며 생기는 기계 에너지를 이용한 전기 에너지 수확에 관한 연구가 많이 진행되고 있다. 일본의 Sound power 회사는 2008년 2월 일본 JR 지하철 도쿄역 개찰구에 '발전마루(發電床)'라는 압전 에너지를 설치해 하루에 6,000W 정도의 전력을 생산하고 있다. 우리나라도 2011년 부산 서면역에 압전 에너지 하베스팅 시스템인 '에너지 블록'을 깔았다. 에너지 블록은 (주)센볼과 (주)티오션이 한국세라믹기술원과 함께 개발한 발전 보도블록으로 국내에서 최초로 상용화된 압전 에너지 하베스팅 제품이다. 부산의 유동인구가 가장 많은 곳인 서면역뿐만 아니라, 서울 성수동 서울숲 공원과 국내 일부 대학에도 계단이나 보도블록에 에너지 블록을 설치해 소량의 전기를 생산하고 있다.

그림 21. (상)서면 지하철에 설치된 압전 에너지 블록 및 (하)JR 지하철 개찰구에 설치된 발전마루

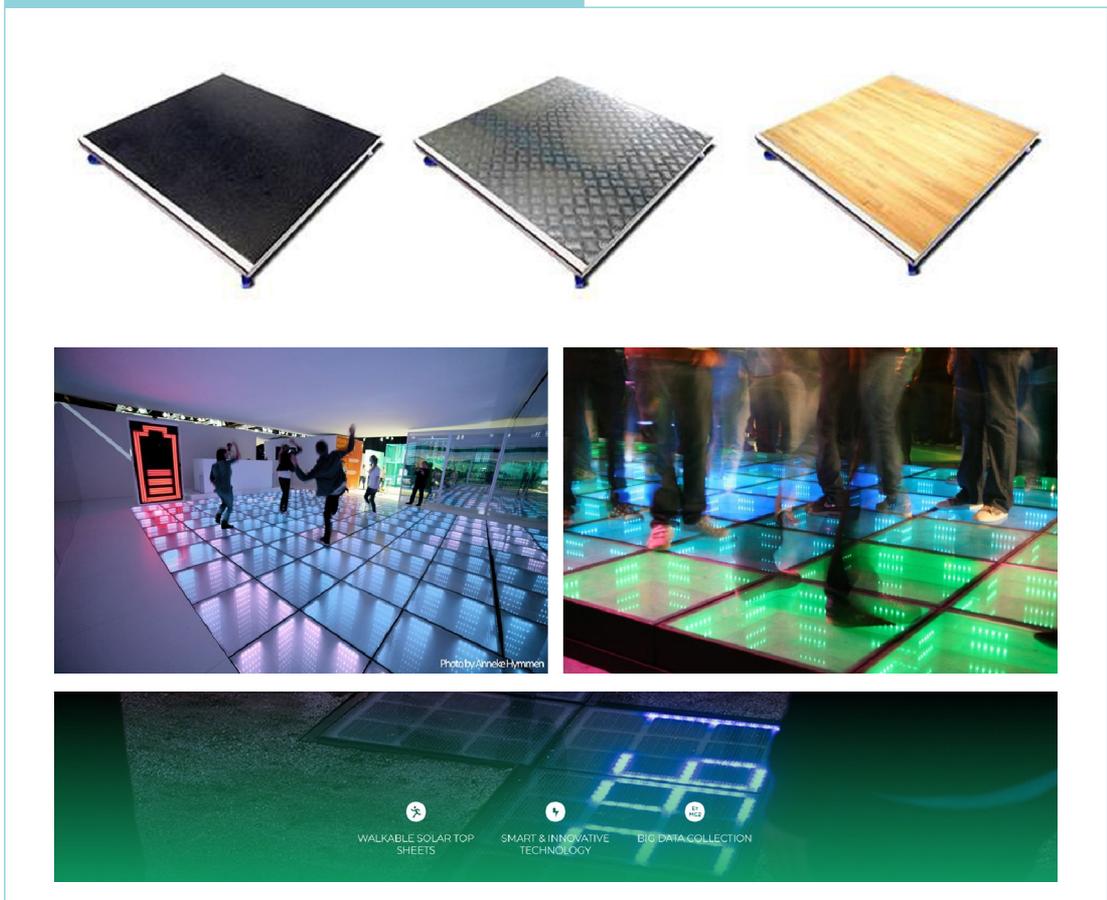


출처: 센볼, Sound Power

3.3. 에너지 플로어

네덜란드 로테르담의 '에너지 플로어(Energy Floors)'도 에너지 하베스팅 상용화 제품으로 주목받는 사례다. 댄스클럽의 바닥에 에너지 발전기를 설치해 사람들이 무대에서 춤을 추면, 그 진동 에너지가 전기 에너지로 변환돼 클럽의 화려한 조명을 켜는데 필요한 전기를 공급하는 시스템이다. 이런 원리를 이용해 댄스클럽뿐만 아니라 박물관, 피트니스 센터, 게임기, 공공시설 등 다양한 분야에 적용해 나가고 있다.

그림 22. 네덜란드 로테르담의 에너지 플로어



출처: Energy Floors

V 웨어러블 기기 응용

1. 인간 동력 에너지 발전기

21세기에 접어들면서, 휴대폰을 비롯하여 사람들이 휴대하는 웨어러블 전자기기들의 수는 차츰 늘어나고 있으며, 고성능화에 따른 전자기기의 소비 전력 또한 갈수록 증대되고 있다. 그러나 이에 반해, 휴대용 전자기기들의 배터리 용량 증가를 위한 기술적 진보는 더디게 진행되고 있다. 휴대용 전자기기의 사용 시간을 늘리기 위해 소비 전력을 최소화시키는 등 많은 기술적 노력을 기울이고 있지만 본질적으로 해결이 쉽지 않다. 최근 이에 대한 해법으로 에너지 하베스팅 기술이 제시되고 있다. 사람의 움직임이나 체온으로부터 전기를 발생시켜, 이를 웨어러블 전자기기의 사용 시간을 늘리기 위한 보조전원이나 충전이 필요 없는 자율전원으로 사용하는 것이다.

〈그림 23〉은 인력을 이용하여 전기 에너지를 발전할 수 있는 여러 가지 수단들을 보여주고 있다. 걸을 때 뒤통치 충격으로부터 2W를 발전할 수 있으며, 무릎관절이나 팔꿈치의 움직임으로부터 각각 7W, 1.5W, 백팩의 위아래 움직임으로부터 15W의 전기 에너지를 발전할 수 있다. 모든 수단을 다 적용했을 때 사람의 인력으로 최대 151W의 전기를 발전할 수 있다. 특히 이러한 인간 동력 에너지 발전 기술은 점점 첨단화되어 가는 미래 병사체계에 유용하게 활용될 것으로 예상되고 있다. 현재에도 무전기, 야시경, 위치추적기, 휴대정보처리기와 같이 개인 병사가 사용하는 전자기기는 상당하며, 이를 구동하기 위한 배터리 휴대 무게도 무시 못하는 실정이다. 물리적으로 휴대할 수 있는 배터리의 양이 제한적이기 때문에 작전 시간 또한 배터리 용량에 비례해서 제한되어 있다. 에너지 하베스팅 기술은 이러한 문제를 해결해 줄 수 있을 것으로 기대하고 있으며, 미국 육군 연구소를 비롯하여 미국의 여러 대학교를 중심으로 많은 연구가 진행되고 있다.

그림 23. 인간 발전기



출처: Pinterest

그림 24. 인간 동력 에너지 발전 기술의 군사 응용

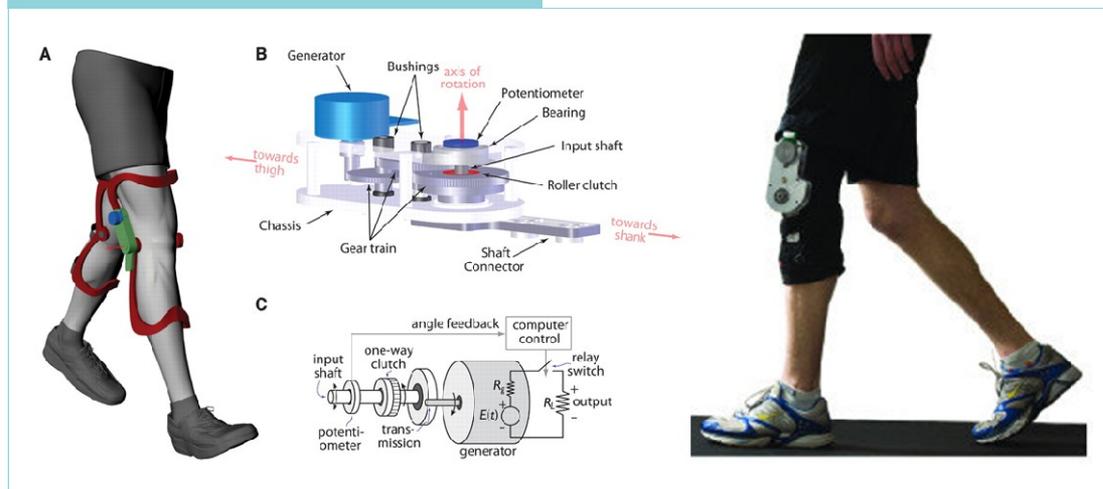


2. 웨어러블 에너지 하베스터

2.1. 무릎관절 발전기

사람의 몸에서 가장 큰 변위와 힘을 낼 수 있는 곳은 무릎관절이다. 캐나다 사이먼 프레이저 대학(Simon Fraser University, SFU)에서는 사람이 걸을 때의 무릎관절 운동을 이용하여, 무릎관절 발전기를 개발해 2008년 Science에 발표하였다. 발전기는 <그림 25>와 같이 몇 개의 기어들과 이와 연결된 전자기 발전기로 구성된 간단한 구조를 가지고 있다. 한쪽 무릎당 5W의 전력을 발전할 수 있으며, 이는 신발형 에너지 하베스터 대비 10배 이상 출력에 해당한다. 걸을 때 약간의 추가 노력으로 상당한 전기를 생산할 수 있기 때문에 전원 공급이 필요한 의족이나 기타 휴대용 의료기기를 충전하는 데에 매우 유용할 것으로 예상된다.

그림 25. 무릎 관절운동을 이용한 발전기



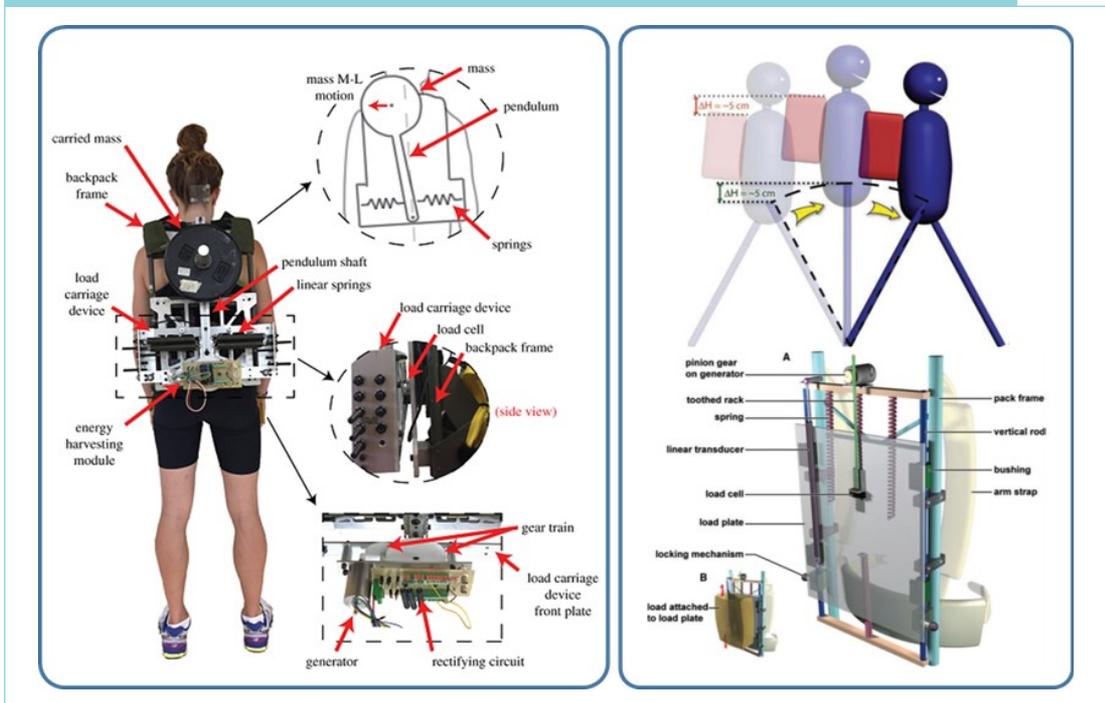
출처: Science 저널

2.2. 백팩 에너지 하베스터

사람이 걸을 때 무게 중심은 상하좌우로 이동하면서 지속적인 진자운동을 하게 된다. 이러한 무게 중심의 이동원리를 이용하여 백팩 형태의 여러 에너지 하베스터들이 개발되었다. <그림 26>의 왼쪽 그림은 좌우 진자 운동을 이용한 에너지 하베스터를 보여주고 있으며, 이 하베스터는 9kg의 무게추를 매고 이동할 때 약 0.22W의 전력을 발전할 수 있다. <그림 26>의 오른쪽 그림은 상하운동을 이용한 백팩 에너지 하베스터로써,

사람이 걸을 때 생기는 약 5cm 정도의 상하 무게 중심 이동을 이용하여 발전하게 된다. 20~38kg 무게인 백팩을 이용하여 런닝머신에서 테스트했을 때 최대 7.4W의 전력을 생성할 수 있었다. 이 정도의 전력은 황무지에서 GPS 위치 추적기와 헤드램프를 무한정으로 작동시키기에 충분한 에너지이다. 전기가 공급되지 않는 황무지에 고립될 가능성이 있는 군인이나 구조대원에게 유용할 것으로 예상된다. 남은 에너지는 경량 배터리에 저장할 수 있으므로, 휴식을 취할 때도 전력을 잃지 않고 GPS 위치 추적기 또는 램프를 작동시킬 수 있다.

그림 26. (좌)좌우 진자 운동 및 (우)상하 진자 운동을 이용한 백팩 에너지 하베스터



출처: Royal Society Open Science 및 Science 저널

2.3. 신발형 에너지 하베스터

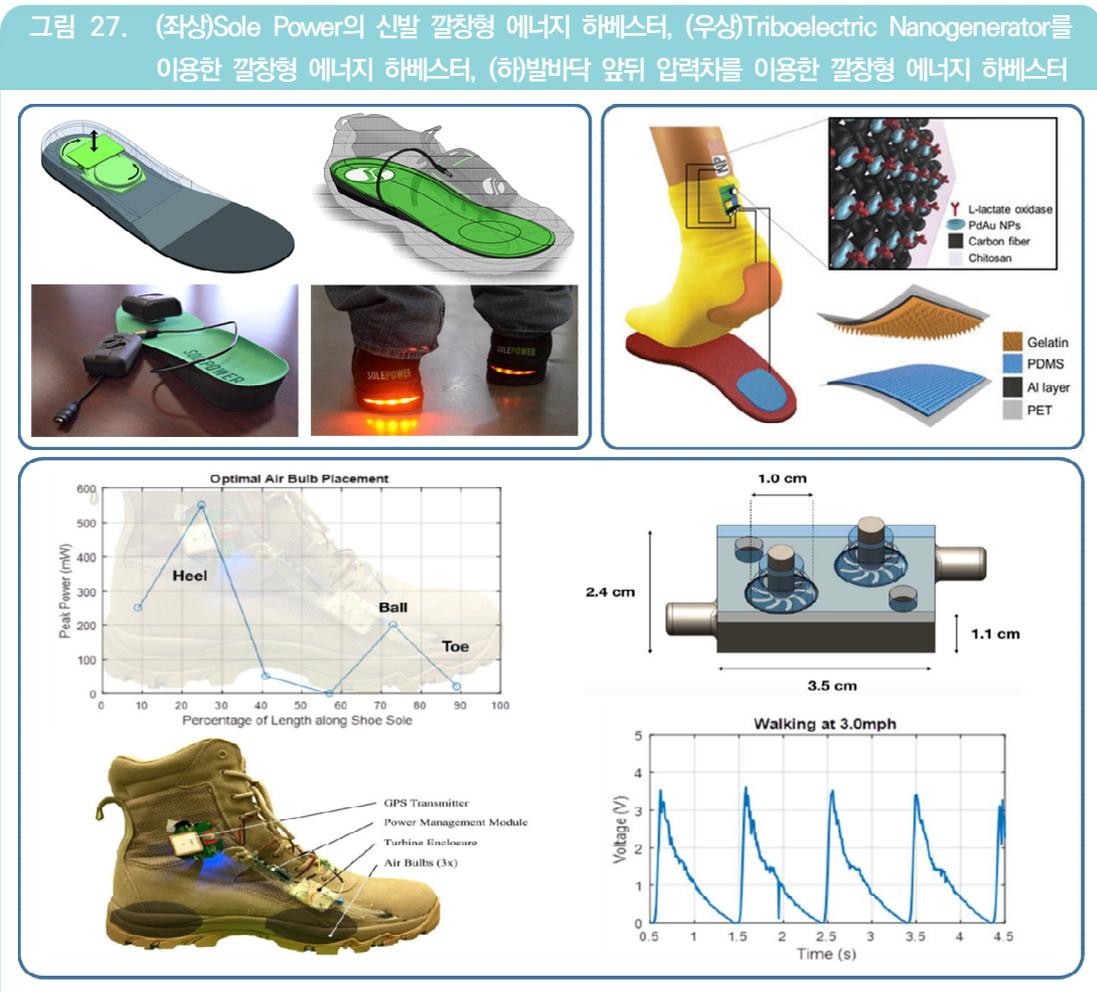
사람이 걸을 때 발 뒤꿈치에 가해지는 충격을 전기 에너지로 변환하여 이용하려는 연구는 에너지 하베스팅 연구가 본격적으로 활성화되기 전부터 지금까지 많이 진행되어 오고 있다. 개발 초기에는 걸을 때 발바닥에 가해지는 충격을 직접적으로 압전체에 가하거나, 충격에 의해 생기는 변위를 지렛대 원리를 이용해 회전운동으로

변환하고 이를 전자기 발전기로 발전하는 방식이 많이 활용되었다. 그러나 이러한 방식들은 발전 에너지를 높이기 위해서는 변위를 키워야하기 때문에 걸음걸이에 불편함을 초래하여 실제로 적용하는데 한계가 있었다. 최근에는 작은 변위에서도 큰 회전을 얻을 수 있거나, 걸을 때 발생하는 발바닥 앞뒤의 압력차를 이용하여 발전하는 방식 등과 같이 걸음걸이에 거의 지장을 주지 않는 방안을 개발하는 방향으로 연구가 많이 진행되고 있다.

미국 스타트업 Sole Power는 걸을 때 발생하는 압력을 기어를 통해 회전운동으로 변환시켜 얇은 두께에서도 큰 출력을 얻을 수 있는 신발 깔창형 에너지 하베스터를 선보였다. 이 깔창형 하베스터를 이용하면 8km만 걸어도 스마트폰을 완전히 충전할 수 있으며, 신발의 종류에 상관없이 깔창을 교환하는 것만으로도 별다른 설치 없이 사용할 수 있는 큰 장점을 가지고 있다.

미국 조지아 공과대학교(Georgia Institute of Technology)의 Zhong lin Wang가 처음으로 제안한 정전기 효과 나노 발전기(Triboelectric Nanogenerator, TENG)를 활용한 신발형 에너지 하베스터도 많이 발표되었다. TENG는 서로 다른 두 대전층의 마찰효과를 이용하기 때문에 소자 구조가 단순하고, 유연한 재료를 사용할 수 있어 걸음걸이에 불편함을 초래하지 않는 장점을 가진다. 그러나 큰 출력을 얻기 위해서는 두 대전층의 거리가 멀어져야 되기 때문에 출력 증가에 한계가 있으며, 지속적인 마찰에 의해 내구성에 문제가 생길 수 있다.

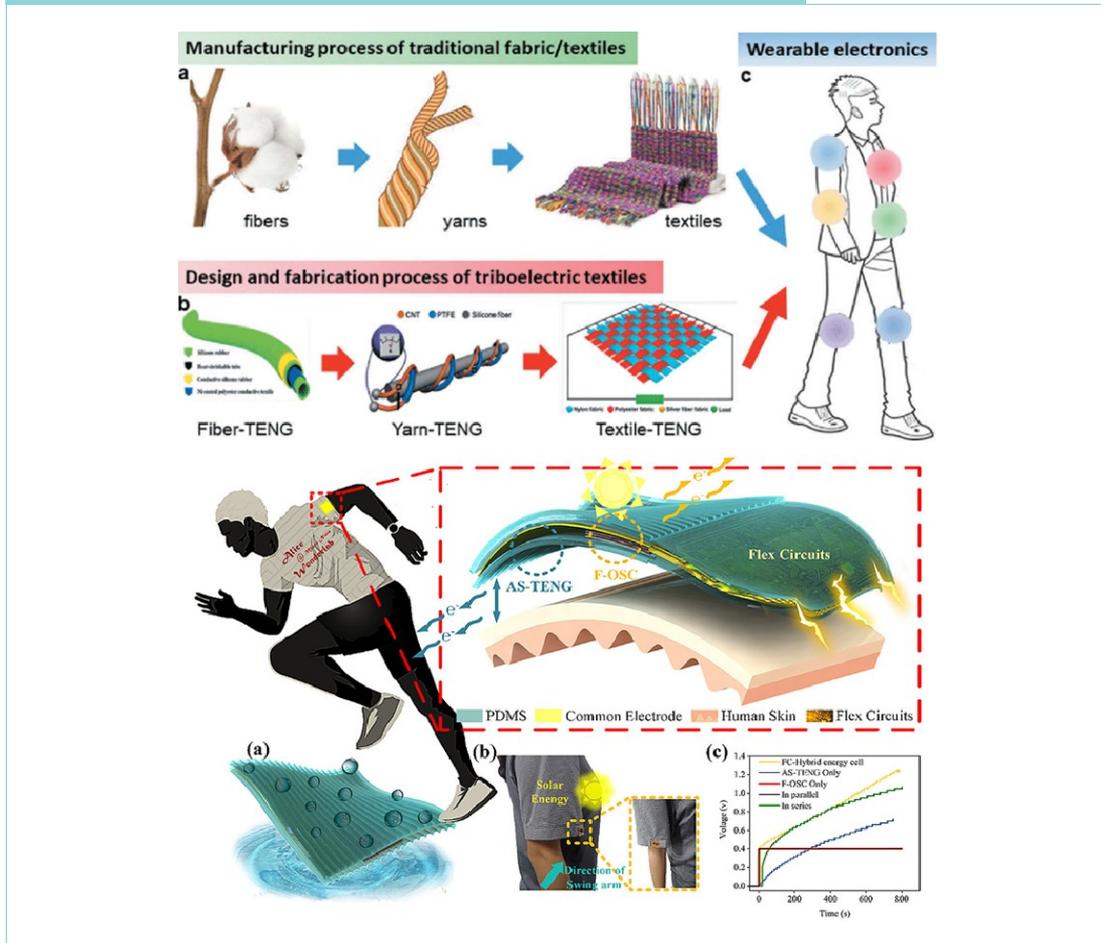
최근 MIT의 김상국 교수는 사람이 걸을 때 발바닥 앞쪽과 뒤꿈치 사이에 압력 차이가 발생하는 것에 착안하여 신발 깔창형 에너지 하베스터를 개발하였다. 발바닥 앞뒤쪽에 각각 공기주머니를 두고 그 사이에 공기 흐름에 의해 회전할 수 있는 마이크로 터빈을 설치하였다. 걸을 때 생기는 발바닥 앞뒤의 압력차에 의해 공기주머니들 사이에 공기 흐름이 생기고, 이 공기 흐름으로부터 마이크로 터빈을 돌려서 전기를 생성하게 된다. 이러한 원리로 생성된 전기 에너지를 이용하여 GPS 위치 추적기를 실시간으로 가동시킬 수 있었다. 사람이 걸을 때 거의 불편함을 느끼지 않으면서도 충분한 에너지를 발생시킬 수 있었다는 것에 큰 의미가 있다. 그리고 에너지 하베스터 구동 GPS 위치 추적기는 작전을 수행하는 군인이나, 구조대, 조난 등산객, 어린이나 치매 노인의 위치를 추적하는데 용이하게 활용될 수 있을 것으로 예상된다.



2.4. Fabric/Textile 에너지 하베스터

Fabric/Textile 형태의 에너지 하베스터를 개발하여 의류에 적용할 수 있다면, 웨어러블 전자기와 결합하기 가장 용이할 것이다. 최근, 미국 조지아 공과대학교(Georgia Institute of Technology)의 Zhong lin Wang 그룹을 중심으로 Fiber 형태의 Triboelectric Nanogenerator(TENG)와 Piezoelectric Nanogenerator(PENG)에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 그러나 Fabric/textile은 기능성만고려한 관계로, 옷에 실제로 적용하기 힘들기 때문에 상용화까지는 많은 시간이 필요할 것으로 예상된다.

그림 28. Fabric/Textile Triboelectric Nanogenerator(TENG)



3. 인체 삽입형 에너지 하베스터

의료기술과 전자기술의 급속한 발전에 힘입어 인공와우, 인공방막, 심박 조율기(Pacemaker) 등의 인공장기 및 인체 삽입형 전자기기들이 하루가 다르게 발전하고 있다. 그러나 이러한 인체 삽입형 전자기기의 발전을 가로막는 가장 큰 장애물은 전원으로부터 자유롭지 못하다는 것이다. 전자기기의 특성상 필수불가결하게 배터리와 같은 전원이 꼭 필요하며, 지속적인 동작을 위해서는 주기적으로 배터리를 교환하거나 충전을 해야 한다. 수술을 통해 인체에 삽입된 기기의 특성상 유·무선으로 충전을 하는 것이 쉽지 않으며, 배터리 교환을 위해서

주기적인 수술을 하는 것도 환자에게는 엄청난 고통이다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 심장의 박동이나, 혈액의 흐름, 근육의 움직임과 같이 인체 내에 존재하는 기계 에너지로부터 에너지 하베스팅 기술을 활용하여 인체 삽입형 전자기기의 동력원을 얻으려는 노력이 많이 진행되고 있다.

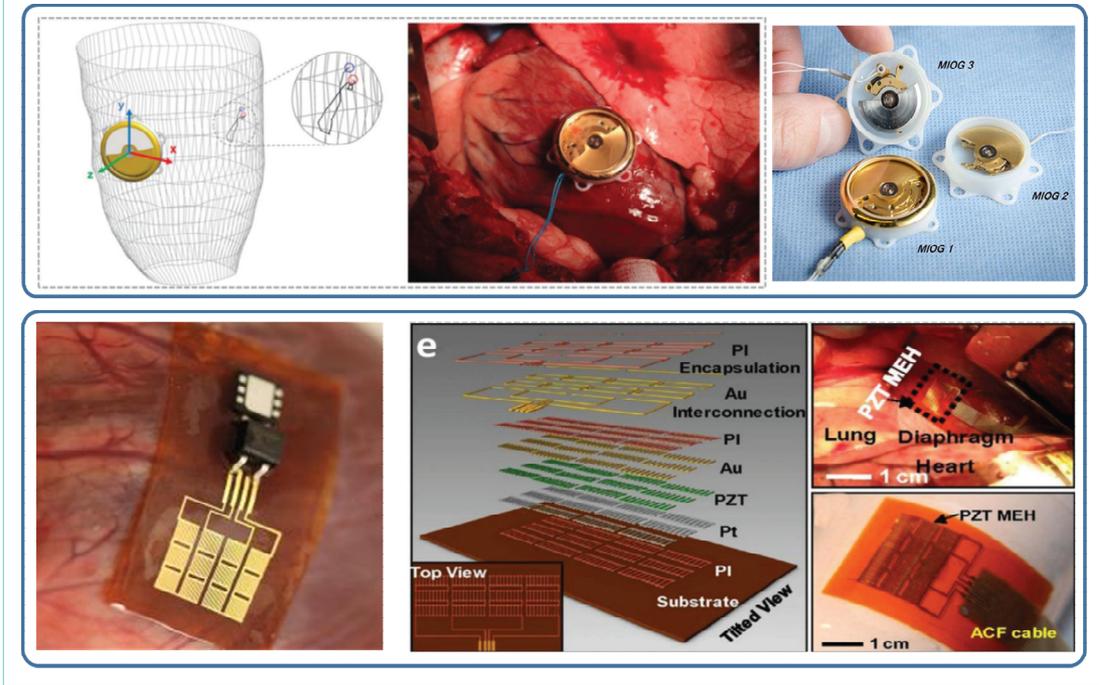
3.1 심박 조율기(Pacemaker)용 에너지 하베스터

심박 조율기는 불규칙한 박동을 감지하면 약한 전기충격을 가해 심장 박동이 제대로 되도록 도와주는 의료기기 로써, 가장 널리 이용되고 있는 인체 삽입형 전자기기이다. 그러나 몇 년에 한 번씩 배터리 교환을 위해 주기적인 수술을 해야 한다는 문제가 있다. 근거리 무선 통신(Near Field Communication, NFC) 기술을 이용하여 전자기기로 무선 충전을 하려는 시도들이 있지만, 온도상승으로 인해서 체내조직이 손상을 입을 가능성이 있기 때문에 적용이 힘든 실정이다. 이에 대한 해결책으로 제시된 것이 심박 조율기에 에너지 하베스팅 기술을 접목하여, 심장 박동 시에 발생하는 기계 에너지로부터 자체적으로 전력을 발생시켜 배터리 교환 없이 영구적으로 사용하게 하는 것이다.

스위스 베른 대학교와 취리히 연방 공과대학교(ETH Zurich) 공동연구진들은 <그림 29>에서 보여주는 것처럼 오토매틱 시계의 Self-winding 시스템을 응용하여, 사람의 움직임에 따라 추가 회전하는 원리를 이용해 전자기 발전기로부터 전력을 생성할 수 있는 심박 조율기용 체내 삽입형 에너지 하베스터를 개발하였다. 로봇팔을 이용하여 실시한 In-vitro 실험으로부터는 $30\mu\text{W}$ 의 전력을 얻을 수 있었으며, 양의 심장에 1시간 이상 실제 설치하고 체내에서 측정한 In-vivo 실험에서는 $16.7\mu\text{W}$ 의 전력을 얻을 수 있었다. In-vivo 실험에서 발생된 전력만으로도 최신 심박 조율기를 구동하는데 충분한 에너지를 공급할 수 있었다.

미국 Northwestern University(노스웨스턴 대학교)의 John Rogers 그룹에서는 심장에 부착하여 유연 압전 소자를 이용해 심장 박동 시에 발생하는 변위를 활용함으로써 발전하는 심박 조율기용 에너지 하베스터를 개발하였다. 유연 압전 에너지 하베스터와 더불어 정류회로와 마이크로 배터리를 하나의 유연 소자 시스템으로 집적시켰다. 양의 심장에 실제 부착하여 구동하였을 때 유연 압전 소자 한 장으로부터는 $0.18\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 의 전력을 얻을 수 있었으며, 유연 압전 소자 다섯 장을 겹쳤을 때는 $1.2\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 의 전력을 발생시킬 수 있었다. 최신 심박 조율기의 구동 전력이 $0.3\mu\text{W}$ 임을 고려할 때, 에너지 하베스터만으로 소자에 충분한 전력을 공급할 수 있음을 입증하였다.

그림 29. (상)오토매틱 시계의 Self-winding 시스템을 응용한 심박 조율기용 에너지 하베스터, (하)유연 압전 소자를 이용한 심박 조율기용 에너지 하베스터



출처: Springer 저널, National Academy of Sciences 저널

VI 맺음말 및 전망

태양전지를 제외한 “에너지 하베스팅”이라는 기술 개념이 쓰이기 시작한 지 아직 채 20년이 되지 않았다. 2010년대에 이르러서 본격적으로 많은 연구가 진행되기 시작했으며, 실용화되어 제품으로 출시된 경우도 아직은 손으로 셀 수 있을 정도로 미미한 수준에 불과하다. 그리고 에너지 하베스팅 기술의 상용화도 주로 스타트업 기업 중심으로 소규모로 진행되고 있는 것이 사실이다. 그러나 에너지 하베스팅 기술을 필요로 하는 응용처는 갈수록 늘어가고 있으며, 머지않은 미래에 기술발전에 의해 전자기기의 전력 소모량이 점점 줄어들게 되면 에너지 하베스터의 수요는 폭발적으로 늘어나게 되어 필수적인 기술로 자리 잡게 될 것이다. 예상컨대, 먼 미래에는 어떤 형태로든 대부분의 기기가 외부의 에너지 공급 없이 자체 전원만으로 작동될 것이며, 현재의 에너지 하베스팅 기술이 그때 기술의 밑바탕이 될 것이라 확신한다.

그림 30. 응용처에 따른 전 세계 진동 에너지 하베스팅 시장 전망

Application	2017	2018	2019	2020	2021	2023	2025	CAGR (2020-2025)
Building & Home Automation	94.07	106.17	119.26	133.59	149.00	183.10	221.57	10.6%
Industrial	25.92	28.82	31.79	34.80	38.04	45.25	53.54	9.0%
Transportation	14.16	15.54	17.01	18.58	20.26	24.01	28.28	8.8%
Consumer Electronics	3.60	3.90	4.20	4.51	4.83	5.53	6.29	6.9%
Security	1.49	1.58	1.67	1.76	1.83	2.00	2.17	4.3%
Total	139.24	156.01	173.93	193.24	213.96	259.89	311.85	10.0%

출처: Market and markets

저자_ 송현철(Hyun-Cheol Song)

• 학력

Virginia Tech. Material Science
and Engineering 박사
고려대학교 재료공학 석사
고려대학교 재료공학 학사

• 경력

現) 한국과학기술연구원 선임연구원
前) 한국과학기술연구원 연구원

참고문헌

〈국내문헌 : 가나다순〉

- 1) 송현철 외 “광대역 압전 에너지 하베스팅 기술” Ceramist Vol. 22, pp. 56~69 (2019)

〈국외문헌: 알파벳순〉

- 2) A. Zurbuchen et al. “Energy harvesting from the beating heart by a mass imbalance oscillation generator,” Ann. Biomed. Eng. Vol. 41, pp. 131–141 (2013).
- 3) C. Dagdeviren et al. “Conformal piezoelectric energy harvesting and storage from motions of the heart, lung, and diaphragm” Proc. Natl. Acad. Sci. Vol. 111, pp. 1927–1932 (2014).
- 4) H. Akay et al. “Energy Harvesting Combat Boot for Satellite Positioning” Micromachines Vol. 9, 244 (2018)
- 5) H.-C. Song et al. “Piezoelectric Energy Harvesting Design Principles for Materials and Structures: Material Figure-of-Merit and Self-Resonance Tuning” Advanced Materials 2002208 (2020)
- 6) H. Wang et al. “Energy harvesting technologies in roadway and bridge for different applications – A comprehensive review” Applied Energy Vol. 212, pp. 1083–1094 (2018).
- 7) I. Jung et al, “Design principles for coupled piezoelectric and electromagnetic hybrid energy harvesters for autonomous sensor systems” Nano Energy Vol. 75, 104921 (2020).
- 8) J. M. Donelan et al. “Biomechanical Energy Harvesting: Generating Electricity During Walking with Minimal User Effort” Science, Vol. 319, pp. 807–810 (2008).
- 9) J. P. Martin et al. “Generating electricity while walking with a medial – lateral oscillating load carriage device” Royal Society Open Science Vol. 6, 182021 (2019).
- 10) L. C. Rome et al. “Generating Electricity While Walking with Loads” Science Vol. 309, pp. 1725–1728 (2005).
- 11) “Energy Harvesting System Market” Markets and Markets, Global Forecast to 2025.

〈기타문헌: 마지막순서(홈페이지주소 등)〉

- 12) <https://perpetuum.com/>
- 13) <https://www.8power.com/>
- 14) <https://kinergizer.com/>
- 15) <https://www.starmicronics.com/>
- 16) <https://cait.rutgers.edu/generating-power-every-time-you-hit-the-road/>
- 17) <http://innowattech.co.il/>

- 18) <http://www.upgen.it/>
- 19) <https://pavegen.com/>
- 20) <http://www.senbool.co.kr/>
- 21) <https://www.soundpower.co.jp/>
- 22) <https://energy-floors.com/>
- 23) <https://www.pinterest.it/pin/567523990514235565/>
- 24) <https://www.popsci.com/content/human-generator/>
- 25) https://www.army.mil/article/138057/soldiers_of_the_future_will_generate_their_own_power
- 26) <https://incompliancemag.com/soldiers-power-up-with-energy-harvesting-wearable-devices/>
- 27) <http://www.solepowertech.com/>



융합연구리뷰

Convergence Research Review 2020 September vol.6 no.9