

# 자체적으로 전력을 조달하는 정밀한 무선 온도 센서

이 글에서는 전원 관리 회로, 자동으로 신뢰할 수 있는 메쉬 네트워크를 형성해서 모든 센서들을 중앙의 액세스 포인트로 무선으로 접속하는 저전력 무선 모듈을 이용한 실제적인 디자인 예에 대해서 살펴보고자 한다.

글/Kris Lokere, Strategic Applications Manager, Signal Conditioning Products, Linear Technology

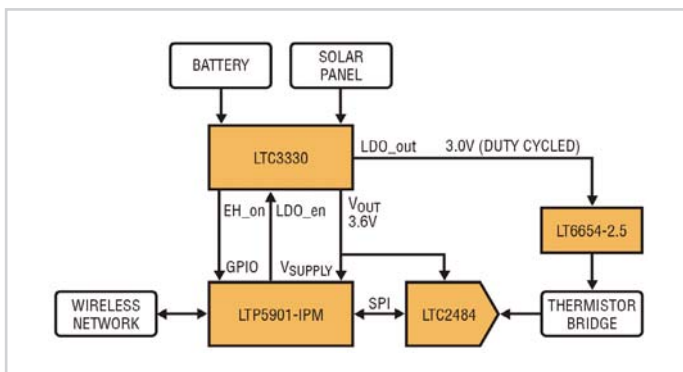
‘사물 인터넷(Internet of Things)’은 오늘날 들어서 사람과 컴퓨터뿐만 아니라 갈수록 더 모든 종류의 사물을 인터넷으로 연결하는 경향을 말한다. 산업 플랜트나 대규모 인프라 프로젝트 같은 애플리케이션에서는 더 많은 장소에 더 많은 센서(혹은 액추에이터)를 연결할수록 효율을 향상시키고, 안전성을 향상시키고, 전혀 새로운 사업 모델을 추진할 수 있다.

공장의 모든 구역으로 케이블을 연결해야 하는 수고로움과 비용을 들일 필요 없이, 오늘날에는 소형 배터리를 이용해서 수년 동안 동작하거나 더 나아가서는 빛, 진동, 온도 차이 등과 같이 이미 이용할 수 있게 존재하는 소스

들로부터 에너지를 포집해서 동작하는 신뢰성이 뛰어난 산업용 등급의 무선 센서들을 설치할 수 있게 되었다.

Linear Technology는 성능과 신뢰성이 뛰어난 저전력 무선 센서 네트워크를 설계하기 위해서 필요로 하는 모든 소자 부품들을 제공한다. 이 글에서는 고분해능 온도 센서, 태양광 에너지를 이용할 수 있을 때는 태양광 에너지를 이용하고 이를 이용할 수 없을 때는 배터리 백업을 이용하도록 하는 전원 관리 회로, 자동으로 신뢰할 수 있는 메쉬 네트워크를 형성해서 모든 센서들을 중앙의 액세스 포인트로 무선으로 접속하는 저전력 무선 모듈을 이용한 실제적인 디자인 예에 대해서 살펴보고자 한다.

그림 1. 무선 모듈을 ADC, 레퍼런스, 서미스터로 연결해서 무선 온도 센서를 구현할 수 있다. 이 회로는 배터리나 태양광 패널로부터 전력을 취하는 에너지 포집을 이용해서 구동한다.



## 디자인의 개요

그림 1은 이 디자인의 블록 다이어그램을 보여준다. 온도 센서는 서미스터를 기반으로 하고 저잡음 LT6654 전압 레퍼런스를 이용해서 바이어스 한다. 24비트 델타-시그마 ADC인 LTC2484는 서미스터 전압을 리딩 하고 이 결과를 SPI 인터페이스를 통해서 통신한다. LTP5901은 무선 부분을 포함하고 또한 자동으로 IP 기반 메쉬 네트워크를 형성하기 위해서 필요로 하는 네트워킹 펌웨어를 포함하는 무선 모듈이다. LTP5901은 또 마이크로프로세서를 내장함으로써 LTC2484 ADC의 SPI 포트를

리딩 하고 신호 체인 소자들의 전원 시퀀싱을 관리한다. LTC3330은 저전력 듀얼 스위치 모드 전원장치로서, 충분한 빛을 이용할 수 있을 때는 태양광 패널로부터 전력을 추출하고 필요에 따라서 배터리를 이용하도록 전환해서 출력 전압 레귤레이션을 유지한다. LTC3330은 또 LDO를 포함함으로써 이를 이용해서 온도 센서로 듀티 사이클로 전력을 공급한다.

### 신호 체인

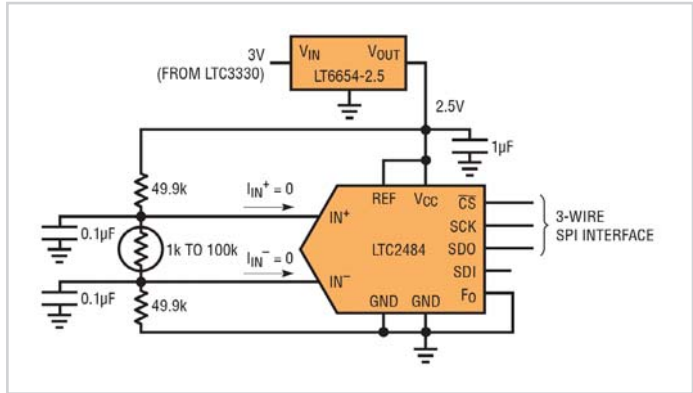
이 디자인은 서미스터를 이용해서 온도를 측정한다. 서미스터는 통상적인 주변 온도를 훨씬 벗어나는 범위에 있는 온도를 측정하기에 적합하다. 서미스터는 온도 계수가 지극히 음적인 저항이다. 예를 들어서 부품번호 KS502J2(제조사: US Sensor)는 25°C일 때는 5kΩ 이고 -30°C~+70°C 온도 범위에 걸쳐서 88kΩ 에서 875Ω 으로 변화한다.

이 서미스터를 2개의 정밀 49.9k 저항과 직렬로 연결하고 정밀 전압 레퍼런스인 LT6654를 이용해서 바이어스 한다(그림 2). LTC2484 델타-시그마 ADC가 24비트 분해능으로 이 저항 분할기 비율을 측정한다. 이 ADC는 총 비교정 오차가 15ppm이므로, 그러면 이 서미스터의 기울기로는 0.05°C 미만의 온도 오차에 해당된다. 이 서미스터는 정확도 사양이 0.1°C이므로, 캘리브레이션(교정)을 하지 않고서도 온도를 이 정확도로 측정할 수 있다.

ADC의 잡음은 4μVpp 미만이므로, 그러면 온도로는 0.005°C 미만의 변화에 해당된다. 그러므로 캘리브레이션 단계를 거치면 이 시스템을 이용해서 지극히 미세한 분해능으로 온도를 측정할 수 있다. 이 ADC가 서미스터 전압 대 레퍼런스 전압의 비를 측정하므로 엄밀히 말하면 레퍼런스가 정밀할 필요는 없다. 하지만 잡음은 낮아야 한다. ADC가 변환을 하는 간격일 때 레퍼런스 전압에 어떠한 변동이 있으면 오차를 야기할 수 있기 때문이다.

LTC2484 ADC는 Easy Drive™라고 하는 입력 구조를 채택하고 있다. 그럼으로써 변환 간격 시에 순수한 차동 샘플링 전류가 거의 제로에 가깝다. 그러므로 저항 서미스터 네트워크를 통해서 흐르는 입력 샘플링 전류에 의해서 어떠한 측정 오차가 유발되지 않으며, 그럼으로써

그림 2. LTC2484 24비트 ADC는 서미스터 전압을 리딩 한다. 입력 공통 모드 (common-mode) 전압을 중심으로 유지함으로써 Easy Drive ADC가 입력 전류를 인출하지 않으므로 간편하게 정확한 비율식(ratiometric) 리딩을 달성할 수 있다.



별도의 연산 증폭기 버퍼를 필요로 하지 않는다. 바이패스 커패시터는 높은 주파수로 낮은 임피던스 경로를 제공한다. 많은 경우에 온도를 지속적으로 측정할 필요는 없고 일 초에 한 번만 측정하거나 심지어는 일 분에 한 번 측정하기도 한다. 그러므로 시스템이 온도를 측정하지 않는 시간에는 전력을 절약하도록 하는 것이 당연하다. 이 애플리케이션 회로는 그렇게 하기 위해서 아래에서 설명하는 것과 같이 하고 있다.

저항 네트워크는 2.5V 레퍼런스로부터 최대 25μA를 소비한다. 측정 사이의 시간에 이와 같은 전력 손실을 피하기 위해서 레퍼런스로 공급되는 전력을 듀티 사이클을 이용해서 측정 간격 시에만 온(on)이 되도록 할 수 있다. ADC 입력에서의 RC 시간 상수는 약 5msec이다. 측정을 취하기 80msec 전에 전력을 턴옴으로써 ADC 입력에서 완전한 안정화가 이루어지도록 할 수 있다. 실제로는 양 입력 노드가 동일한 기울기로 턴옴 하므로 이론적 안정화 시간보다 훨씬 전에 리딩이 정확해진다. LT6654는 LTC3330의 3V LDO 출력으로부터 전력이 공급된다. LTP5901의 마이크로프로세서가 온도 리딩을 수행하기 전과 수행한 후의 해당 시점에 LTC3330의 LDO 인에이블 핀을 하이와 로우로 구동한다.

LTC2484는 변환을 하지 않는 시간에는 자동으로 슬립 모드로 전환한다. 1μA의 슬립 전류는 무선 부분의 이미 낮은 전력에 비해서도 낮은 것이다. 그러므로 ADC로 공급되는 전력을 듀티 사이클로 공급할 필요가 없다. ADC

를 LTP5901과 동일한 전원 전압으로 지속적으로 구동되도록 함으로써 SPI 인터페이스의 로직 레벨을 동일하게 할 수 있고, 그럼으로써 디자인을 간소화할 수 있다.

SPI 포트를 통해서 변환 결과를 제공한 후에는 LTC2484가 자동으로 새로운 변환을 시작하고 이 결과값을 자신의 내부 레지스터에 저장한다. 이렇게 하면 온도를 매우 빈번하게 리딩 해야 하는 시스템에서 편리하다. 하지만 일부 극저전력 애플리케이션에서는 리딩 간격 사이에 긴 시간을 기다릴 수 있다. 그러므로 사용자에게 보고되는 온도가 항상 '최신의' data를 유지하기 위해서, 이 애플리케이션에서는 먼저 CSb 핀과 SCK 핀을 토글 해서 ADC 레지스터로부터 비교적 '오래된' 이전의 온도 값을 비워내도록 하고 있다. 그러면 자동으로 새로

운 온도 변환을 시작한다. 이 변환이 완료될 때까지 마이크로프로세서가 기다렸다가 SPI 포트를 통해서 결과값을 리딩 한다. 그리고 다시 새로운 온도 리딩이 자동으로 시작되더라도 이 추가적인 리딩의 결과값은 무시되기 때문에 시스템이 서미스터 네트워크를 켜둔 한(LDO를 턴오프 함으로써).

이 온도 센서 회로의 전체적인 전력 소모는 다음과 같이 계산할 수 있다. 먼저, 레퍼런스(350 $\mu$ A), 서미스터 네트워크(25 $\mu$ A), ADC(변환 중일 때 160 $\mu$ A)의 전류를 합하면 총 535 $\mu$ A이다(표 1). 그런 다음에는 이 전류가 얼마나 오랫동안 온(on)으로 지속되는지 계산한다. ADC는 변환을 하기 위해서 약 140msec이 걸리고, 그 전에 레퍼런스와 서미스터가 안정화하도록 80msec을 기다린다. 여기에 SPI 리드아웃에 걸리는 시간을 더하면 약 300msec의 온 시간이다. 300msec 동안 535 $\mu$ A의 전류를 소모한다면 160 $\mu$ C(300msec x 535 $\mu$ A)의 전하에 해당된다. 여기에서 전압 레퍼런스의 4.7 $\mu$ F 전원 바이패스 커패시터를 충전하는데 필요한 전하를 더해야 한다. 매 리딩 시에 이 노드가 0V에서 3V로 재충전되기 때문이다. 이 14 $\mu$ C의 전하를 더하면 매 온도 리딩에 총 174 $\mu$ C를 소모하는 것이다. 매 10초마다 한 번의 온도 리딩을 한다면 평균 전류 소모는 17 $\mu$ A(174 $\mu$ C/10sec)인 것으로 계산된다. 표 2에서는 각기 경우에 따른 평균 공급 전류 예를 보여준다.

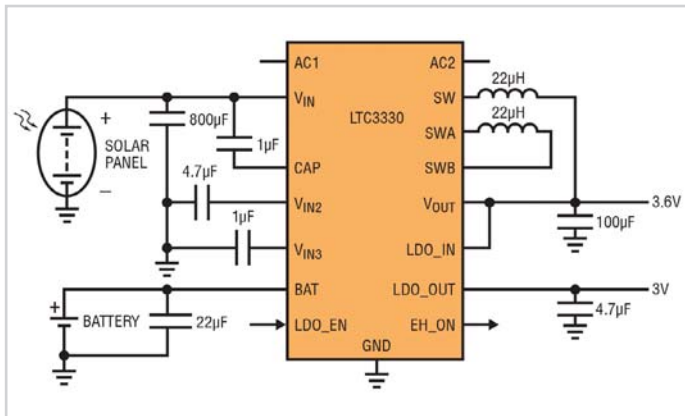
표 1. 신호 체인의 전류 소모 (동작 중일 때)

LT6654 Reference	350 $\mu$ A
Thermistor Network	25 $\mu$ A
LTC2484 ADC	160 $\mu$ A
Total	535 $\mu$ A

표 2. 리딩 빈도에 따른 평균 신호 체인 전류 소모

Temperature Read Frequency	Average Current
Once per second	170 $\mu$ A
Once per 10 seconds	17 $\mu$ A
Once per minute	2.9 $\mu$ A

그림 3. LTC3330이 태양광 패널과 배터리 사이에 자동으로 전환해서 전력을 취해서 레귤레이트 된 출력 전압을 유지한다. 추가적인 LDO 출력은 로직 입력 핀에 의해서 제어되고, 이를 이용해서 온도 센서로 듀티 사이클로 전력을 공급한다. LTC3330이 태양광 전력을 이용하는지 배터리 전력을 이용하는지 지시하는 출력 플래그를 발생시킨다.



### 전원 관리

LTC3330이 이 애플리케이션의 모든 전원을 관리한다. LTC3330은 소형 모노리식 패키지로 2개 스위치 모드 전원과 1개의 선형 레귤레이터를 포함하고 있다. 백-부스트 컨버터는 배터리로부터 전력을 취해서 레귤레이트 된 출력 전압을 유지한다(이 애플리케이션에서는 3.6V로 설정). 또 다른 백 컨버터는 태양광 패널로부터 전력을 취해서 역시 출력 전압을 동일한 레벨로 레귤레이트 한다. 내부적 우선순위가 태양광 전력을 이용할 수 있을 때는 태양광 전력을 이용하고 필요할 때만 배터리로부터 전력을 인출하도록 한다(그림 3). 또 다른 애플리케이션에 이용할 수 있도록 LTC3330은, 진동 에너지에 비례한 AC 전압을 발생시키는 피에조 크리스탈 등을 비롯

그림 4. LTC3330 에너지 포집 DC/DC 배터리 수명 연장 디바이스는 압전, 태양광, 자기 소스로부터 에너지를 포집 할 수 있다.



한 AC 에너지 포집을 지원한다(그림 4).

LTC3330은 1 $\mu$ A 미만의 정지 전류를 소모하므로 이러한 저전력 무선 애플리케이션에 이용하기에 적합하다. 전원장치에서의 전력 손실이 총 전력 손실의 아주 일부분에 불과하므로 대부분의 전력이 '부하'에 이용된다. 부하는 온도 센서와 무선 네트워크이다.

2개 스위치 모드 전원장치와 더불어서, LTC3330은 별도의 LDO 인에이블 핀이 있는 LDO를 포함한다. 이 기능은 이와 같은 듀티 사이클 애플리케이션에 이용하기에 편리하다. 이 LDO를 이용해서 전압 레퍼런스와 서미스터 네트워크를 구동한다. 이렇게 함으로써 스위칭 잡음을 낮출 수 있을 뿐만 아니라, 신호 체인으로 공급되는 전력은 온 및 오프로 전환하고 무선 모듈로 공급되는 전력은 항상 온으로 유지할 수 있다. 무선 모듈은 전송 간격 사이에 많은 전력을 소모하지는 않으나 타이머가 적절히 작동되도록 하기 위해서 항상 바이어스 되어 있어야 한다. 그래야 전체적인 네트워크가 시간 동기화를 유지할 수 있다. 온도 리딩을 하도록 신호 체인을 준비시키기 위해서 무선 모듈 내의 마이크로프로세서가 적절한 시점에 LDO 인에이블 핀을 시퀀싱 한다.

LTC3330이 출력 플래그(EH\_ON)를 제공해서 전력을 배터리로부터 가져오는지 아니면 태양광 패널로부터 가져오는지를 시스템에 알려준다. 이 정보를 실시간으로 액세스할 수 있게 하면 최종 사용자에게 유용한 정보가 된다. 그러므로 이 애플리케이션에서는 무선 모듈 내의 마이크로프로세서가 이 출력 플래그를 읽고 이를 온도 데

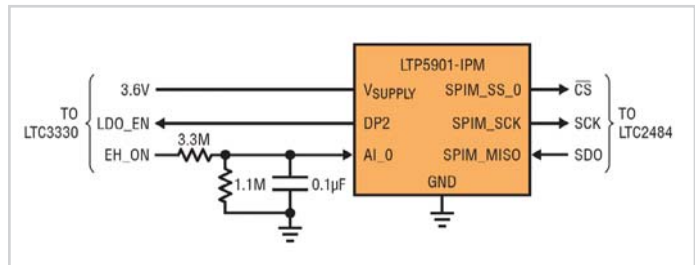
이터와 함께 네트워크를 통해서 전송하도록 하고 있다. 이 EH\_ON 출력의 로직 레벨을 LTC3330의 내부 바이어스 전압으로 참조한다. 이 전압은 동작 모드에 따라서 변동적이고 4V보다 높을 수 있다. 이 출력 핀을 곧바로 무선 모듈의 저전압 로직 입력으로 연결하는 것이 아니라, 이를 분할하고 마이크로프로세서에 통합하고 있는 10비트 ADC로 피드 하도록 했다. 이 예에서는 이 ADC를 LTC3330이 어느 전원 소스를 이용하는지를 지시하기 위한 비교기로만 이용하고 있다.

### 무선 네트워킹

LTP5901은 무선 트랜시버, 임베디드 마이크로프로세서, 네트워킹 소프트웨어를 포함하는 포괄적인 무선 모듈이다. 형태는 소형 인쇄 회로 보드와 같고, 이 애플리케이션의 나머지 부분(신호 체인과 전원 관리)을 담고 있는 메인 회로 보드로 간편하게 솔더링 할 수 있다.

이 애플리케이션에서 LTP5901은 무선 네트워킹과 하우ски핑 마이크로프로세서의 두 가지 기능을 수행한다(그림 5). 네트워크 매니저 근처에서 다중의 LTP5901 노드들이 파워업 되어 있으면 이들 노드들이 자동으로 서로를 인식하고 무선 메시 네트워크를 형성한다. 전체적인 네트워크가 자동으로 시간 동기화를 이룬다. 이는 다시 말해서 각각의 무선 노드가 매우 짧은 특정한 시간 간격 동안만 파워온 된다는 뜻이다. 그러므로 각각의 노드가 센서 정보의 소스로 동작할 뿐만 아니라 다른 노드들로부터의 데이터를 매니저로 전달하기 위한 루팅 노드로 동작

그림 5. LTP5901-IPM은 이 전체적인 애플리케이션을 작동하기 위해서 지극히 소수의 배선만을 필요로 한다. 펌웨어와 RF 회로를 비롯한 모든 무선 네트워킹 기능을 내장하고 있다. 3와이어 SPI 마스터는 LTC2484의 SPI 포트와 통신한다. GPIO 핀(DP2)은 센서로의 전원 시퀀싱을 제어한다. 내부적인 ADC는 편리한 레벨 변환기로 동작해서 LTC3330으로부터의 에너지 포집 상태 플래그 EH\_ON을 리딩 한다.



한다. 그럼으로써 고도로 신뢰할 만한 저전력 메쉬 네트워크를 형성하고, 루팅 노드들을 포함한 모든 노드들이 매우 낮은 전력으로 동작하더라도 각기 노드로부터 매니저로 다중의 경로를 이용할 수 있게 된다. 이러한 무선 기술의 통상적인 거리는 노드 간에 100미터인데, 탁 트인 야외 같은 조건이라면 그보다 긴 거리도 가능하다.

LTP5901은 ARM Cortex-M3 마이크로프로세서 코어를 포함하고 있으며, 이 코어가 네트워크 소프트웨어를 실행한다. 또한 이 코어는 사용자가 제공하는 펌웨어를 이용해서 사용자 애플리케이션에 특정한 작업을 수행하도록 프로그램 할 수 있다. 그러므로 어떠한 써드파티 마이크로프로세서를 필요로 하지 않고서 많은 애플리케이션을 구현할 수 있다. 이 예에서는 LTP5901 내의 마이크로프로세서가 온도 리딩 사이에 전력을 절약하도록 하기 위해서 LTC3330의 LDO를 적절한 시점에 턴온 및 턴오프 해서 온도 센서로 공급되는 전원 시퀀스를 관리한다. LTP5901은 온도 센서를 리딩 하는 24비트 ADC의 SPI 포트와 직접 통신한다. 또한 LTP5901은 LTC3330으로부터 전원 상태 출력 플래그(EH\_ON)를 리딩 한다. 이 출력 플래그는 이 회로를 구동하기 위해서 태양광을 이용하고 있는지 배터리를 이용하고 있는지를 지시한다.

Linear Technology의 웹사이트 [www.linear.com/products/smartmesh\\_ip](http://www.linear.com/products/smartmesh_ip)로 들어가서 SmartMesh Power와 Performance Estimator 온라인 툴을 이용하면 무선 부분의 전력 소모를 계산할 수 있다. 20개 모트(mote)로 이루어진 네트워크이고 이 중에서 10개 모트는 매니저로 직접 무선 접속을 이루고 있고(1홉) 나머지 10개 모트는 매니저로 간접적으로 접속을 이루고 있다면(2홉), 평균 전력 소모는 2홉 노드는 약 20 $\mu$ A이고 1홉 노드는 약 40 $\mu$ A이다. 이 수치는 각각의 노드가 10초에 한 번씩 온도 리딩을 할 때이다. 1홉 노드가 약 두 배의 전력을 소모하는 것은 이들 노드는 자신의 센서 데이터를 전송해야 할 뿐만 아니라 일부 2홉 노드의 센서 데이터를 전달하기 위한 루팅 노드로도 동작해야 하기 때문이다. 그런데 'advertising'이라고 하는 기능을 끄면 이 전력 수치를 1/2 가량 더 줄일 수 있다. 'advertising' 기능을 끄면 이 네트워크에 합류하고자 하는 새로운 노드들을 더 이상 인식하지 못한다. 이 점을 제외하고는 네트워크 동작에는

아무런 영향을 미치지 않는다.

### 전체적인 전력 소모

이 전체적인 애플리케이션 회로의 총 전력 소모는 각기 센서가 얼마나 자주 온도를 측정하고 네트워크에서 노드들이 어떻게 구성되었는지를 비롯한 여러 가지 요인들에 따라서 달라질 것이다. 10초에 한 번씩 측정하는 센서 노드의 정격 전력 소모는 센서 부분이 20 $\mu$ A 미만이고 무선 부분이 20 $\mu$ A 미만으로 총 평균 부하 전류는 약 40 $\mu$ A이다.

소형의 2인치 x 2인치 태양광 패널(Amorton 시리즈 같은)은 비교적 중간적인 실내 광 조건이라 하더라도(200룩스) 40 $\mu$ A를 발생시킬 수 있고 밝은 빛일 때는 훨씬 더 높은 수준을 발생시킬 수 있다. 그러므로 이는 이 애플리케이션이 많은 경우에 오로지 태양광 패널로부터 공급되는 전력만을 이용해서 가동할 수 있다는 뜻이 된다. 만약에 이 회로를 어두운 곳에 설치하고 전적으로 배터리 전력으로만 작동해야 한다고 하더라도 2.4Ah AA 배터리(Tadiran XOL 시리즈 같은)를 이용해서 이 애플리케이션을 거의 7년 동안 구동할 수 있다. 조도가 약하거나 변동적일 때는 이 회로가 자동으로 태양광 전력을 사용하는 것에서 배터리 전력을 사용하는 것으로 전환할 수 있으므로 어느 수준의 태양광 전력을 이용해서나 배터리 수명을 연장할 수 있다.

### 요약

Linear Technology의 신호 체인, 전원 관리, 무선 네트워크 디바이스들을 이용함으로써 진정한 의미의 무선적인 센서 네트워크 제품을 설계할 수 있다. 시간 동기화를 이루는 무선 메쉬 네트워크를 형성함으로써 최소한의 전력을 이용해서 한 노드에서 다른 노드로 데이터를 신뢰할 수 있게 전송할 수 있다. 온칩 마이크로프로세서는 센서 회로로 듀티 사이클로 전력을 공급할 수 있다. 효율적이며 고도로 통합적인 전원 관리 IC는 전적으로 소형 태양광 패널만을 이용해서 이 애플리케이션을 구동할 수 있으며 또한 소형 배터리를 이용해서 수년 동안 동작할 수 있다. **SM**