

## 센서 네트워크 시뮬레이터를 이용한 라우팅 프로토콜의 전력소모량 분석

김방현<sup>0</sup> 정용덕 김대규 김종현  
연세대학교 컴퓨터정보통신공학부

sofe21@gmail.com<sup>0</sup>, legnamai@chol.com, windcry@korea.com, jhkim34@yonsei.ac.kr

### Power Consumption Analysis of Routing Protocols using Sensor Network Simulator

Yong-doc Jung<sup>0</sup> Bang-hyun Kim, Tea-kyu Kim, Jong-Hyun Kim

Computer and Telecommunications Engineering Division, Yonsei University

#### 요 약

유비쿼터스 컴퓨팅의 인프라가 되는 센서 네트워크는 매우 작은 하드웨어로 이루어지는 많은 수의 센서 노드들로 구성된다. 이 네트워크의 토폴로지와 라우팅 방식은 그 목적에 따라 결정되어야 하며, 하드웨어 및 소프트웨어도 필요한 경우에는 변경되어야 한다. 따라서 그러한 네트워크를 최적으로 설계하기 위해서는 시스템 동작을 확인하고 성능을 예측할 수 있는 센서 네트워크 시뮬레이터가 필요하다. 현존하는 몇몇 센서 네트워크 시뮬레이터들은 특정 하드웨어나 운영체제에 맞추어 개발되었기 때문에, 그러한 특정 시스템들을 위해서만 사용될 수 있다. 그리고 시스템 설계 상의 주요 이슈가 되는 전력 소모량 및 프로그램 실행 시간을 추정하기 위한 어떤 수단도 지원하지 못하고 있다. 이 연구에서는 기존의 센서 네트워크 시뮬레이터들이 갖고 있는 문제점을 해결한 시뮬레이터를 개발하고, 센서 네트워크의 계층적 라우팅 프로토콜인 LEACH, TEEN, APTEEN의 전력소모량을 시뮬레이션을 이용하여 분석하였다.

시뮬레이션의 작업부하인 명령어 트레이스로는 ATmega128L 마이크로컨트롤러용 크로스컴파일러에 의해 생성된 실행 이미지를 사용하였다. 따라서 각각의 라우팅 프로토콜을 실제 센서 보드에서 동작하는 응용 프로그램으로 구현하고, 컴파일된 실행 이미지를 작업부하로 사용하여 시뮬레이션 하였다. 라우팅 프로그램들은 ETRI의 센서 네트워크 운영체제인 Nano-Q+ 1.6.1을 기반으로 구현되었으며, 하드웨어 플랫폼은 옥타컴의 센서 보드인 Nano-24이다. 시뮬레이션 결과에 따르면, 센서 네트워크는 그 사용 목적에 따라 라우팅 프로토콜을 적절히 선택해야 한다는 것을 알 수 있다. 즉, LEACH는 주기적으로 네트워크의 상황을 체크해야 하는 경우에 적합하고, TEEN은 환경의 변화를 수시로 감지해야 하는 경우에 적합하다. 그리고 APTEEN은 전력소모량과 기능 측면을 모두 고려할 때 가장 효과적인 라우팅 프로토콜이라고 할 수 있다.

#### 1. 서 론

미국의 'Business Week'지는 미래의 기술이라는 특집 기사에서 비즈니스 관점에서 주목해야 할 네 가지 기술에 센서 네트워크(sensor network)를 포함시켰고[1], MIT의 'Technology Review'지는 세상을 바꿀 10가지 미래 기술들 중의 하나로 "Brain-Wireless Sensor Networks"를 제시하기도 하였다[2]. 이와 같이 미래의 주요 기술로 주목받고 있는 센서 네트워크는, 최근 일상 생활에 산재한 사물과 물리적 대상이 점차 정보의 대상으로 확대됨에 따라 인간과 컴퓨터 및 사물들이 유기적으로 연계되어 다양하고 편리한 새로운 서비스를 제공하는 유비쿼터스 컴퓨팅(ubiquitous computing)의 핵심 인프라가 될 것으로 예상되고 있다.

센서 네트워크를 위한 핵심 기술인 라우팅 프로토콜은 어떠한 환경의 센서 네트워크를 구성하는가에 따라 프로토콜의 방식이 결정된다. 만약 적합하지 않은 프로토콜을 적용할 경우 불필요한 전력소모를 가져옴으로써 센서 네트워크 본연의 작업을 수행할 수 없게 된다. 따라서 센서 네트워크 설계 이전에 프로토콜의 방식을 결정하는 것이 무엇보다 중요하며, 최적의 센서 네트워크 라우팅 프로토콜의 조건은 다음과 같다[3];

- 인접한 센서의 데이터는 주변 노드들의 데이터와 유사하므로 모든 센서 노드가 데이터를 전송할 경우 전력 낭비가 된다. 따라서 인접한 노드들의 데이터를 모아서 한번에 전송하는 방식이 필요하다.
- 센서 노드들 간의 라우팅 경로는 센서 노드의 상태와 전력소모 상태에 따라 달라져야 한다. 만약 정해진 경로를 사용할 경우 특정 노드의 전력소모가 증가될 수 있다. 따라서 센서 네트워크를 구성하는 모든 센서 노드들이 균등한 전력을 소모하는 것이 센서 네트워크를 장시간 지속할 수 있는 방법이다.
- 센서 노드들은 센서의 전력소모 또는 주변 환경에 의해 동작이 실패하거나 기능이 소멸되는 경우가 있는데, 이러한 경우에도 전체적인 센서 네트워크의 동작에는 영향을 미치지 않아야 한다. 이를 위해서는 네트워크 라우팅을 정적이 아닌 동적 라우팅 기법을 사용하여야 한다.

본 연구에서는 동일한 환경에서 센서 네트워크 라우팅 프로토콜의 종류에 따른 전력소모량을 통하여 프로토콜의 성능과 효율성을 분석하였다. 실험한 프로토콜들은 현재 대표적인 계층적 라우팅 프로토콜로서, LEACH(low

energy adaptive clustering hierarchy)[4], TEEN (threshold sensitive energy efficient sensor Network protocol)[5], APTEEN(adaptive periodic threshold sensitive energy efficient sensor network protocol) [6]이다. 프로토콜의 전력소모량을 추정하기 위하여 사용한 기계명령어-레벨의 센서 네트워크 시뮬레이터(machine instruction-level sensor network simulator: 이하 MISS라 함)[7]는 시스템 클럭 수준으로 시뮬레이션의 정밀도를 높임으로써 전력소모량 및 실행시간 추정이 가능한 시뮬레이터이다. 라우팅 프로토콜은 ETRI의 센서 네트워크용 운영체제인 Nano-Q+ 1.6.1[8]을 기반으로 구현되었으며, 하드웨어 플랫폼은 옥타컴의 센서 보드인 Nano-24[9]를 대상으로 하였다.

2. 관련 연구

2.1 계층적 라우팅 프로토콜

무선 센서 네트워크에서 인접한 노드간의 유사한 정보의 중복 전달로 인한 에너지 낭비를 줄이기 위한 데이터 모음(data aggregation)이 필요하다는 특성을 고려할 때 클러스터링에 기반한 계층적 라우팅 기법이 많은 장점을 가진다. 즉, 센서 노드들이 지역 클러스터를 형성함으로써 센서 노드들은 해당 지역에서 발생한 사건에 대한 유사한 정보를 해당 클러스터의 헤드 노드로 전송하고 클러스터 헤드가 데이터 모음을 수행하여, 보다 에너지 효율적인 라우팅이 가능하게 된다. 클러스터링 기반 라우팅 프로토콜에서 센서 네트워크는 그림 1과 같은 형태로 구성된다. 센서 노드들은 각 클러스터 단위로 네트워크가 작게 분할되고, 각 클러스터의 헤드 노드가 자신의 클러스터로부터 데이터를 수집하고 이를 싱크 노드로 전달한다. 이러한 방식의 계층적 라우팅 프로토콜로서는 LEACH, TEEN, APTEEN이 있다.

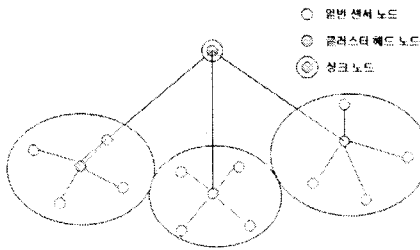


그림 1 클러스터링 기반 계층적 라우팅 프로토콜

LEACH는 클러스터 헤드가 클러스터의 멤버 노드들로부터 데이터를 수집하고 데이터 퓨전을 통하여 데이터를 모아서 직접 싱크 노드로 전달한다. 이 기법의 특징은 네트워크에 있는 모든 센서 노드들의 에너지 소비를 공정하게 분산시키기 위해 에너지 집약적인 기능을 하는 클러스터 헤드를 라운드라는 일정 시간 단위로 무작위로 순환시키고, 전체적인 통신비용을 줄이기 위해 클러스터 헤드에서 클러스터내의 데이터를 모아 지역적으로

전송하는 것이다. LEACH는 클러스터가 결정되는 라운드마다 모든 센서 노드들은 클러스터 헤드로 데이터를 전송하게 된다[4].

반면에 TEEN은 센서 노드들이 주기적으로 전송할 데이터를 가지지 않는다. 즉, 클러스터 헤드가 주변 노드들에게 전달한 임계값을 넘지 않을 경우 주변 센서 노드들은 데이터를 헤드 노드로 전송하지 않는다. 임계값은 클러스터 헤드 형성 결정 시간에 전달되므로 응용에 따라 사용자가 에너지 소비와 센서 네트워크 상태 판단의 정확성을 조절할 수 있다는 특성을 가진다. 그러나 센서 노드가 감지한 데이터가 임계값을 넘지 않을 경우 데이터 전송이 이루어지지 않으므로 센서 노드마다 전력소모량에 차이가 발생하게 된다[5].

APTEEN은 사전적 센서 네트워크의 LEACH와 반응적 센서 네트워크인 TEEN의 한계점을 최소화하면서 둘의 장점을 통합하는 하이브리드 네트워크를 제공한다. APTEEN을 채택한 하이브리드 네트워크에서 센서 노드들은 데이터를 주기적으로 전송할 뿐만 아니라, 축적한 데이터의 갑작스런 변화에도 반응한다. APTEEN은 TEEN과 유사한 방식으로 데이터를 처리하지만 센서 노드가 카운트 시간동안 데이터를 전송하지 않을 경우를 대비하여 주기적으로 데이터를 전송하는 방식을 추가하였다. APTEEN은 주기적인 데이터를 전송하여 사용자에게 네트워크의 전반적 상황을 제공하고, 갑작스런 네트워크 상태의 변경에 즉각적으로 반응하여 시간 임계적 상황에 대응하도록 하였다. 하지만 APTEEN은 임계치 기능과 카운트 시간을 구현하는데 부가적인 비용이 요구된다는 단점을 가진다[6].

2.2 MISS

MISS는 기존의 센서 네트워크 시뮬레이터들과는 달리 특정한 프로그램이나 운영체제에 의존하지 않으면서 다양한 센서 네트워크 환경을 설계 및 검증할 수 있고, 더불어 전력소모량과 실행시간 추정도 할 수 있는 범용 센서 네트워크 시뮬레이터이다. MISS는 이산-사건 시뮬레이션 기법을 이용함으로써 센서 노드 내부 모듈 및 센서 노드들 간 동작의 시간 동기화를 가능하게 하였다. 또한 기계명령어-레벨의 시뮬레이션 작업부하를 사용하여 시스템 클럭 수준으로 시뮬레이션의 정밀도를 높임으로써 전력소모량 및 실행시간 추정을 가능하게 하였다.

MISS는 기계명령어-레벨의 시뮬레이터이기 때문에 실제 구현에 있어서는 센서 보드의 하드웨어 특성에 의존성을 갖는다. 따라서 MISS는 현재 센서 네트워크 연구에서 가장 널리 사용되고 있는 MICAz 형식의 센서 보드인 Crossbow 사의 MPR2400 보드와 옥타컴 사의 Nano-24 보드를 지원한다. MICAz 형식의 센서 보드에는 Atmel 사의 ATmega128L 마이크로컨트롤러와 ChipCon 사의 CC2420 RF 트랜시버가 장착되어 있다.

MISS가 사용하는 시뮬레이션 작업 부하는 실제 센서 보드에 적재되는 실행 이미지로서, ATmega128L 마이크로컨트롤러용으로 크로스 컴파일되어 실제 센서 보드에 적재되는 인텔 헥스-레코드 형식(Intel's hex-record format: .hex), 롬 이미지 형식 (ROM image format: .rom), 그리고 S-레코드 형식(S-record format: .srec)

의 파일을 사용한다. 기계명령어-레벨의 시뮬레이션 방법은 이 실행 이미지를 시뮬레이션 엔진의 가상 센서 노드에 적재한 다음에, 실제 센서 노드에서 프로세서 명령어가 실행되는 방법과 거의 동일하게 이루어진다. 즉, 그림 2와 같이 시뮬레이션은 실제 센서 노드와 동일하게 가상 플래시 메모리에서 현재 프로그램 카운터(PC)가 가리키는 위치의 기계명령어를 인출하여, 기계명령어의 비트 패턴을 분석하고 실행함으로써 이루어진다[7].

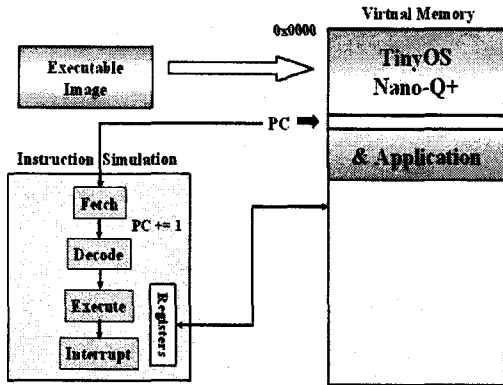


그림 2. 기계 명령어 레벨의 시뮬레이션

실험에 사용한 하드웨어 플랫폼은 옥타컴의 Nano-24이다. 그림 3에서 보는 바와 같이 Nano-24는 RISC 구조의 ATmega128L 마이크로컨트롤러와 ChipCon사의 CC2420 모듈의 RF 저 전력 트랜시버가 장착되어진 센서 보드이다. Nano-24는 모두 7개의 센서(온도, 조도, 습도, 가스, 초음파, 초전, 가속도) 입력 값을 받아서 A/D 변환을 하여 RF모듈에 의해 무선으로 데이터를 주고받을 수 있고, 기본적인 출력으로는 3개의 LED(red, green, yellow)가 있다. 또한 추가적으로 정보를 저장할 수 있는 외부 플래시메모리(flash memory) 512 Kbyte와 외부 SDRAM 32 Kbyte를 지원한다[9].

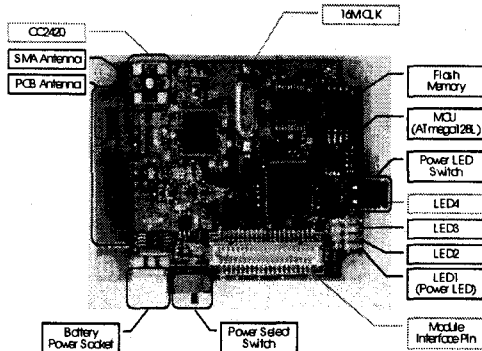


그림 3. Nano-24의 구조

### 3. 실험 방법

본 연구에서는 MISS를 이용하여 센서 네트워크를 위한 계층적 라우팅 프로토콜들의 성능을 비교하였다. 실험 대상으로 선택한 프로토콜은 앞에서 설명한 LEACH, TEEN, APTEEN 라우팅 프로토콜이다. 각 프로토콜은 C언어로 구현하였으며, ETRI의 센서 네트워크용 운영체제인 Nano-Q 1.6.1에서 컴파일 하였다. 시뮬레이션은 CPU가 펜티엄-4 2.8 GHz이고 메모리가 1 GB인 PC에서 실험하였다.

본 실험에서 가정한 센서 네트워크 환경은 건물 내 두 개의 서로 다른 구역에서의 난방 관리 시스템을 모델로 구현하였다. 각각의 구역은 하나의 클러스터에 해당하며, 각 클러스터에는 5개의 센서 노드가 존재한다. 각 클러스터에서는 매 라운드마다 클러스터 헤드 노드가 변경되며, 변경 방식은 라운드-로빈(round-robin) 방식에 의해 1번 노드부터 5번 노드까지, 6번 노드부터 10번 노드까지 헤드 노드가 매 라운드마다 순차적으로 변경된다. 선출된 헤드 노드는 주변 센서 노드의 데이터를 라우팅 프로토콜의 방식에 의해 수집한 후 싱크 노드로 전송한다. 싱크 노드는 클러스터와는 별도의 노드로서 각 클러스터 헤드 노드로부터 데이터를 수신한 후 사용자에 게 알려주는 역할을 한다.

실험 환경 설정은 실제 환경과 유사한 환경을 시뮬레이터의 환경 변수로 설정하였다. MISS의 환경 변수 설정 파일을 이용하여 시뮬레이션 이전에 10개의 센서 노드가 측정하게 될 온도 값을 시간에 따라 변화하도록 설정하였다. 또한 TEEN과 APTEEN의 경우 임계값을 고려해야 하기 때문에 임계값은 70°C로 설정하고, 실험 시간은 10시간으로 하였으며, 온도 변화는 30분마다 변화도록 설정하였다. 결과적으로 하나의 센서 노드는 총 20번의 온도 변화가 일어나며, 그 중 약 7%가 임계값을 넘는 온도가 측정되도록 하였다. 그림 4는 이러한 센서 노드들의 온도 설정을 보여준다.

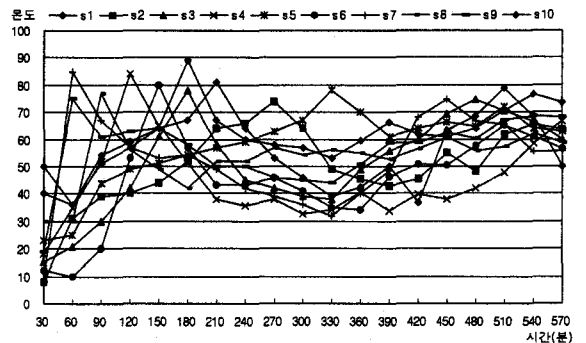


그림 4. 센서 노드별 온도 설정

LEACH는 클러스터 헤드 노드가 변경되는 라운드마다 온도 측정을 하기 때문에, 5분 간격마다 클러스터 헤드는 주변 노드의 온도 값을 싱크 노드로 전송한다. TEEN은 특정 주기 없이 온도가 임계값인 70°C가 넘을 경우에

만, 클러스터 헤드가 해당 센서 노드와 온도 값을 싱크 노드로 전송한다. 클러스터 헤드 노드 전송은 LEACH와 같이 주기가 없기 때문에 데이터가 전송될 경우마다 헤드 노드의 변경이 이루어지도록 하였다. 임계값을 넘을 경우 최대한 빨리 사용자에게 알려야 하기 때문에, 전력 소모를 고려하여 각 센서 노드들은 1분마다 자신의 온도 값을 측정하도록 하였다. APTEEN은 LEACH와 TEEN의 기능을 혼합한 방식이므로 주기적 전송과 임계값에 반응한 전송이 동시에 발생한다. 임계값에 의한 전송이 이루어지기 때문에 LEACH처럼 5분을 주기로 전송할 경우에는 불필요한 전력소모가 발생하게 된다. 따라서 APTEEN에서는 주기적 전송이 20분마다 발생하도록 하였다.

4. 실험 결과

세 가지 프로토콜을 시뮬레이션 한 결과는 센서 보드의 전체 전력소모량과 RF 통신에 의해 소모되는 전력소모량으로 구분하여 분석하였다. 소모 전력량은 Nano-24 보드와 유사한 센서 보드인 Crossbow 사의 MPR2400 보드 [10]의 전력소모량을 이용하여 계산하였으며, 세부 전력소모량은 표 1과 같다. 표 1에서 "Sensor Board"는 센서 보드에서 마이크로컨트롤러와 RF 모듈을 제외한 모듈들이 소모하는 전력량을 나타낸다. 그리고 "Battery Loss Ratio"는 전지 방전으로 자연적으로 손실되는 전력량을 나타내고, "Logger Memory"는 'Atmel AT45DB041' 플래시 메모리에서 소모되는 전력량을 나타낸다.

표 1. 센서 보드의 세부 전력소모량

구분	전력 소모량(mA-hr)
Sensor Board(Full operation)	5.0
Sensor Board(Sleep)	0.005
Processor(Full operation)	12.0
Processor(Sleep)	0.01
RF(Rx)	19.7
RF(Tx)	17.0
RF(Sleep)	0.001
Battery Loss Ratio	0.03
Logger Memory	0.002

그림 5의 시뮬레이션 결과에 따르면, LEACH가 가장 많은 전력을 소모하였고, TEEN이 가장 적은 전력을 소모하였다. 이렇게 라우팅 프로토콜에 따라 전력소모량이 차이가 나는 주요 이유는 센서 보드의 동작 시간 중에 슬립(sleep) 시간이 차지하는 비율 때문이다. 표 1에서 보는 바와 같이, 센서 보드가 슬립 상태일 때에는 평상시에 비하여 전력소모량이 약 1/100로 감소한다. 따라서 RF 동작이나 센싱의 발생 간격이 짧을수록, 슬립 시간이 차지하는 비율이 감소하여 전체 전력소모량은 증가한다. 또한 RF 동작 시간이 센싱 시간에 비하여 상당히 길기 때문에, RF 동작의 빈도수가 전체 전력소모량을 결정하는 주요 요인이 된다. 그래서 RF 동작 빈도수가 높은 LEACH가 가장 많은 전력소모량을 나타내는 것이다.

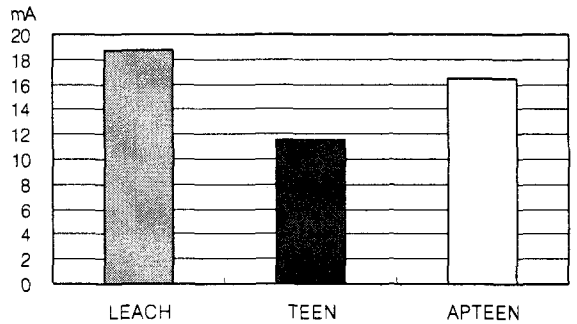


그림 5. 센서 보드의 전체 전력소모량

RF 동작 빈도수가 전체 전력소모량의 주요 요인이라는 것은 RF 통신을 위한 전력소모량을 나타내는 그림 6에서 나타난다. 전체 실험 시간에서 RF 통신의 빈도수가 낮기 때문에 RF 통신을 위한 전력소모량이 전체 전력소모량에 영향을 주지는 않는다. 그러나 그림 6은 프로토콜에 따른 RF 통신 시간의 차이를 나타내고, 이것은 슬립 시간에 차이를 의미한다. 즉, RF 통신 시간이 가장 긴 LEACH가 슬립 시간이 가장 짧기 때문에 전체 전력소모량이 가장 많은 결과를 보여준다. 한편 TEEN이 LEACH에 비하여 매우 적은 전력소모량을 나타내야 함에도 불구하고, 그림 5와 같은 결과가 나타나는 것은 1분 간격으로 온도 센싱을 하기 때문이다. 이를 통하여 전력소모량에 있어서 RF 통신이 센싱보다 더 큰 요인임을 알 수 있다.

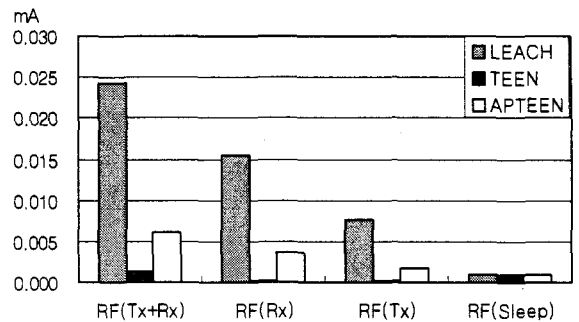


그림 6. RF 통신을 위한 전력소모량

각 센서 노드가 갖고 있는 전력량을 2000mA로 설정하였을 때, 각 프로토콜을 적용한 센서 네트워크의 예상 수명 기간이 그림 7에 나타나 있다. TEEN이 72일로서 가장 긴 수명 기간을 가지고, LEACH가 44일로 가장 적은 수명 기간을 가지며, APTEEN은 58일로서 두 프로토콜의 중간 정도의 수명 기간을 가진다. 결과적으로 센서 네트워크는 그 사용 목적에 따라 라우팅 프로토콜을 적절히 선택해야 한다는 것을 알 수 있었다. 즉, LEACH는 전력 소모는 많지만 주기적으로 네트워크의 상황을 체크해야

하는 경우에 적합하고, TEEN은 최소한으로 전력을 소모 하면서 환경의 변화를 수시로 감지해야 하는 경우에 적합하다. 그리고 APTEEN은 전력소모량과 기능 측면을 모두 고려할 때 가장 효과적인 라우팅 프로토콜이라고 할 수 있다.

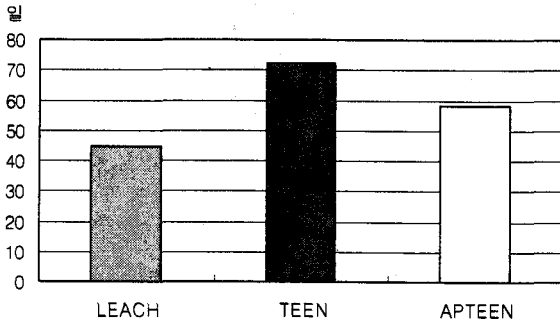


그림 7. 센서 네트워크 예상 수명 기간

### 5. 결론 및 향후 연구과제

본 연구에서는 계층적 라우팅 프로토콜인 LEACH, TEEN, APTEEN을 실제로 구현하고, 이를 센서 네트워크 시뮬레이터인 MISS를 사용하여 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션 결과에 따르면, 라우팅 프로토콜에 따라서 전력소모량에 차이가 발생하는 주요 요인은 슬립 시간이다. 그리고 슬립 시간에 가장 큰 영향을 주는 요인은 RF 통신 시간이고, 다음으로 영향을 주는 요인은 센싱 시간이다. 그래서 LEACH가 가장 많은 전력을 소모하는 프로토콜이고, TEEN이 가장 적은 전력을 소모하는 프로토콜임을 알 수 있었다.

본 연구의 결과는 두 가지 면에서 의의가 있다. 먼저 센서 네트워크의 계층적 라우팅 프로토콜들을 응용프로그램으로 구현하고 검증하였다는 것이다. 즉, 센서 네트워크의 라우팅 프로토콜에 대한 기존의 연구들이 확률과 통계 기반의 이론적 연구인 반면에, 본 연구는 실제로 프로토콜을 구현한 실용적 연구라는 것이다. 이것이 가능한 이유는 이전 연구[7]의 결과로 얻은 MISS가 실제 센서 보드에 적재되는 실행 이미지를 작업부하로 사용하며, 실행시간 및 전력소모량 추정이 가능한 센서 네트워크 시뮬레이터이기 때문이다. 이러한 MISS를 이용하여 다른 분야의 센서 네트워크 연구를 진행할 수 있었다는 것이 본 연구의 또 다른 의의이다. 앞으로 MISS를 활용할 수 있는 다양한 분야의 센서 네트워크 연구를 계속하여 진행하는 것이 향후 연구과제이다.

### 6. 참고 문헌

[1] Business week, August 2003.  
 [2] MIT Enterprise Technical Review, February 2003.  
 [3] 배정수, 김성희, "무선센서네트워크에서의 라우팅

프로토콜", 주간 기술 동향, April 2004.  
 [4] Wendi B. Heinzelman et al, "An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks", IEEE Trans. on Wireless Communications, vol 1, No 4, pp660-670, October 2002.  
 [5] Srati Manjeshwar et al, "TEEN : A Routing Protocol for Enhanced Efficiency in Wireless Sensor Networks", Proc. Second Int'l Workshop, Parallel and Distributed Computing Issues in Wireless Networks and Mobile Computing, 2001.  
 [6] Arati Manjeshwar et al, "APTEEN : A Hybrid Protocol for Efficient Routing and Comprehensive Information Retrieval in Wireless Sensor Networks", IEEE Proc. Of the Int'l. Parallel and Distributed Processing Symposium(IPDPS'02), pp195-202, April 2002.  
 [7] 김방현, 김태규, 정용덕, 김종현, "전력소모량 및 실행시간 추정이 가능한 센서 네트워크 시뮬레이터의 개발", 한국시뮬레이션학회 논문지, 제15권 제1호, pp35-41, 3. 2006.  
 [8] Nano-Q+, <http://qplus.or.kr>.  
 [9] Nano-24, <http://www.octacomm.net>.  
 [10] Crossbow, "MPR/MIB User Manual", April 2005.