

무선 센서 네트워크에서 센싱 커버리지를 고려한 Wake-up 스케줄링 프로토콜

정희원 조재규*, 김길수*, 권태경*, 종신회원 최양희*

The Simple Wakeup Scheduling Protocols Considering Sensing Coverage in Wireless Sensor Networks

Jaekyu Cho*, Gilsoo Kim*, Taekyoung Kwon* *Regular Members,*
Yanghee Choi* *Lifelong Member*

요약

무선 센서 네트워크의 노드들은 제한된 배터리 에너지 자원으로 운용되고, 사용자로부터 원거리 또는 산악지대와 같이 배터리 교체가 쉽지 않은 곳에 배치되기 때문에 한정된 에너지를 효율적으로 사용하는 기술이 매우 중요하다. 이를 위해 여러 가지 프로토콜들이 연구되어 왔는데, 특히 wakeup 스케줄링 프로토콜은 가장 효과적이고 실용적인 기법으로 간주되어 왔다. Wakeup 스케줄링 프로토콜에서는 같은 지역에 대해 중복되게 센싱하고 있는 노드들이 있다면 적정한 수의 노드만 활동하게 하고 나머지는 활동하지 않게 함으로써 전체적인 네트워크의 에너지 사용 효율을 높일 수 있다. 본 논문은 무선 센서 네트워크에서 관심지역을 중복하여 센싱하는 노드의 수를 최소화하면서 응용에서 요구하는 센싱 커버리지 수준을 유지하는 wakeup 스케줄링 프로토콜을 제안한다. 제안된 프로토콜은 이웃 노드와의 가중 평균거리를 이용하여 작동여부를 결정하게 되며 네트워크의 상황에 따라 wakeup 할 수 있는 기준치를 동적으로 변화함에 따라 요구된 센싱 커버리지를 오랫동안 유지될 수 있도록 해준다.

Key Words : Wireless sensor network, Wakeup scheduling, Sensing coverage, Energy efficiency

ABSTRACT

A crucial issue in deploying wireless sensor networks is to perform a sensing task in an area of interest in an energy-efficient manner since sensor nodes have limited energy power. The most practical solution to solve this problem is to use a node wake-up scheduling protocol that some sensor nodes stay active to provide sensing service, while the others are inactive for conserving their energy. In this paper, we present a simple wake-up scheduling protocol, which can maintain sensing coverage required by applications and yet increase network lifetime by turning off some redundant nodes. In order to do this, we use the concept of a weighted average distance. A node decides whether it is active or inactive based on the weighted average distance. The proposed protocol allows sensor nodes to sleep dynamically while satisfying the required sensing coverage.

* 본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업의 일환으로 추진되고 있는 지식경제부의 유비쿼터스컴퓨팅및네트워크원천기술개발사업의 과제와 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 IT신성장동력 핵심기술개발사업[2007-F-038-02, 미래 인터넷 핵심기술 연구]의 일환으로 수행하였으며 연구를 위해 연구장비를 지원하고 공간을 제공한 서울대학교 컴퓨터연구소에 감사드립니다.

* 서울대학교 전기컴퓨터공학부 멀티미디어/이동통신 연구실 (jkcho@mmlab.snu.ac.kr, gskim@mmlab.snu.ac.kr, tkkwon@snu.ac.kr, yhchoi@snu.ac.kr)

논문번호 : KICS2007-12-567, 접수일자 : 2007년 12월 14일, 최종논문접수일자 : 2008년 11월 12일

I. 서 론

무선 센서 네트워크 (Wireless Sensor Networks)는 많은 수의 센서 노드들을 특정지역에 배치하여 그 지역에서 발생하는 각 중 이벤트 (events)를 모니터링 (monitoring)하고 수집한 정보를 사용자에게 전달한다. 센서 네트워크를 구성하는 센서 노드들은 애드 hoc 네트워크 (Ad hoc Network)를 구성하는 노드들과는 달리 소형이고 제한된 자원을 가지고 있으며 상대적으로 많은 수의 센서 노드들이 넓은 지역에 배치되어 다양한 동작 토폴로지를 가지는 특징이 있다^{[1][2]}. 이러한 특징 중에서 가장 중요하게 고려되어야 할 사항은 센서 노드의 제한된 에너지 자원을 효율적으로 사용하는 방안이다. 왜냐하면 대부분의 센서 노드들은 배터리를 에너지 공급원으로 하고 있고, 사용자들로부터 원거리 배치되거나 또는 산악지대, 사막과 같이 접근이 곤란한 지역에 배치되기 때문에 배터리를 교환하거나 충전하여 사용하기 어렵기 때문이다. 따라서 최근의 많은 논문들^{[3][4]}은 센서 노드들의 에너지 소비를 줄이는데 중점을 두고 연구를 하고 있다.

무선 센서 네트워크에 배치된 센서 노드들은 모니터링 임무를 동시에 수행하고 있기 때문에 불필요하게 많은 수의 센서 노드들이 동시에 같은 일을 수행하는 것은 제한된 에너지를 효율적으로 사용하는 방법이 아니라고 할 수 있다^[5]. 따라서 적절한 수의 센서 노드들만이 할당된 임무를 수행하고, 나머지 다른 센서 노드들은 활동하지 않게 하는 스케줄링 기법을 사용함으로써 센서 노드들의 에너지 사용 효율을 높일 수 있고, 결과적으로는 센서 네트워크의 수명도 연장되어 오랜 시간 동안 주어진 임무를 수행할 수 있다. 이를 위해 우리는 센서 네트워크가 배치된 지역이 여러 노드로 인해 중복되어 센싱 되는 것을 최소화하기 위해 각 노드가 자신의 유효 센싱범위를 고려하여 작동여부를 결정하는 ESP (Effective sensing area based Scheduling Protocol) 프로토콜을 제안하였다^[6]. 그러나 ESP는 유효 센싱범위를 계산하기 위해서 각 노드는 자신의 정확한 위치를 알고 있어야 한다는 문제점이 있었다. 자신의 정확한 위치를 측정하기 위해서 GPS (Global Positioning System) 장비를 사용하거나 Anchor/Beacon 노드를 설치할 수도 있지만, 이는 값싼 센서 노드들로 구성된 센서 네트워크에서는 많은 제약이 따른다. 또한 미리 정해진 유효 센싱범위 기준치에 노드의 동작여부를 결정하기 때문에 센싱 커버리지는 시간이 지날수록 지속적으로 감소하여 응용에서 원하는 센싱 커버리지 수준을 오랫동안 제공하지 못

하였다.

따라서 본 논문은 위와 같은 ESP 프로토콜의 문제점을 해결하면서 적절한 수의 노드를 이용하여 응용에서 요구하는 센싱 커버리지를 오랜 시간동안 제공할 수 있는 wakeup 스케줄링 프로토콜을 제안한다. 본 논문에서 제안된 프로토콜은 다음과 같은 특징을 가지고 있다. 첫째, 자신의 wakeup 동작여부를 결정하기 위해 GPS에 의한 자신의 정확한 위치가 아닌 이웃 노드와의 상대거리 정보만을 이용한다. RSSI (Received Signal Strength Indication) 등에 의해 얻어진 상대 거리 정보^[7]을 통해 가중 평균거리로 노드의 동작여부를 결정하기 때문에 간단한 계산으로 프로토콜을 실행할 수 있다. 둘째, 네트워크 상황에 따라 wakeup 동작여부를 판단하는 기준치 (threshold)를 동적으로 변화시킨다. 동적으로 변화시킨 기준치는 주변 노드들의 에너지 수준에 따라 낮추어감으로써 많은 수의 생존노드가 존재함에도 불구하고 응용에서 요구하는 센싱 커버리지를 유지하지 못하는 점을 방지하여 효율적인 센싱 커버리지 서비스를 제공한다. 셋째, 코디네이터에 의해 자신의 wakeup 스케줄링이 결정되는 것이 아니라, 센서 노드 내에서 로컬 (local) 하게 결정함으로써 완전히 분산된 방법을 제공하고, 모든 센서 노드들이 균등하게 에너지를 소모하게 하여 전체적인 네트워크의 수명을 증가시킨다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 관련연구를 살펴보고 III장에서는 제안하는 센서 노드의 wakeup 스케줄링 프로토콜을 소개한다. IV장에서는 모의실험을 통하여 제안한 프로토콜의 성능을 평가하고 마지막으로 V장에서는 결론을 맺는다.

II. 관련연구

최근 많은 논문들이 센싱 커버리지를 고려하면서 에너지 효율적인 기법을 제시하고 있다.

PEAS^[8]은 Probing Environment 와 Adaptive Sleeping의 두 가지 알고리즘으로 구성된다. Probing Environment의 경우 노드는 sleep상태에서 깨어나게 되면 PROBE 메시지를 probing 범위 내의 노드들에게 보내게 되고 PROBE 메시지를 받은 노드는 REPLY메시지를 보내게 된다. 이 때 PROBE 메시지를 보낸 노드는 REPLY메시지를 받지 못한 경우에만 계속 깨어있게 되고 그 이외의 경우에는 다시 sleep상태로 돌아가게 된다. Adaptive Sleeping은 깨어있는 노드의 수를 유지하기 위한 것으로, 깨어있는 노드는 aggregate probing rate를 조사하게 되고 이를 REPLY메시지에 같이 실어

보내게 된다. 이를 보고 probing노드는 자신의 sleep시간을 조절하게 된다. PEAS는 다른 energy-conserving 알고리즘과 기본적인 아이디어를 같이하고 있지만 기존의 알고리즘과 차이점을 나타내는 부분은 node failure가 빈번하고 node의 밀집도가 매우 높으며 node의 computing 능력이 매우 제한적인, 열악한 환경에서의 작동을 가정한 알고리즘이라는 것이다.

PEAS는 한번 깨어나게 되면 배터리가 완전히 소진되거나 물리적인 이상이 있을 때까지 계속 깨어 있게 된다. 이러한 경우 시간이 지날수록 정상 작동할 수 있는 노드의 수는 줄어들게 되고 결과적으로는 네트워크의 분리나 노드들의 고립을 가져오게 된다. 이를 개선시키기 위해 PECAS^[9]에서는 Collaborating Adaptive Sleeping Scheme을 제안한다. 노드는 계속 깨어 있는 것이 아니라 Next_Sleep_Time 만큼만 깨어 있고 그 이후에 sleep하게 된다. 또한 Next_Sleep_Time 값을 REPLY 메시지에 실어 보내서 REPLY 메시지를 받은 노드가 Next_Sleep_Time + ε 만큼 sleep한 후 깨어나게 하여 자신의 역할을 대체 할 수 있도록 한다. 이러한 방법을 통해 네트워크의 수명을 연장하면서도 노드들의 에너지를 균등하게 소비시킬 수 있다. 그러나 PECAS 역시 PEAS와 같이 작동중인 노드들의 센싱범위에서 많은 중복이 발생하여 효율적이 못하다는 단점이 있다.

[10]에서 각 노드는 Local neighbor information만을 이용하여 자신의 작동여부에 대해 주기적으로 결정을 내린다. 만약 노드가 담당하고 있던 영역을 이웃의 노드들이 완벽하게 대체해줄 수 있다면 노드는 자신의 전원을 끌 수 있기 때문에 각 노드는 이웃 노드들이 지원해줄 수 있는 영역 (Sponsored coverage)을 계산하여 자신의 전원 유/무를 판단한다. 전원 유/무에 대한 판단을 여러 노드가 동시에 내리게 될 경우 blind point가 발생할 수 있으므로 이 문제를 해결하기 위해 Back-off scheme이 사용된다. 이러한 과정을 통해서 프로토콜은 일부 노드가 동작하는 동안에 다른 노드들은 전원을 off 할 수 있도록 해서 에너지의 사용을 줄일 수 있지만 기본적으로 한 노드의 센싱영역을 완벽하게 대체해 줄 수 있어야 하므로 PEAS나 PECAS에서와 동일한 문제를 나타내게 된다.

[11]에서는 본 논문에서 제시되는 것과 같이 거리 정보만을 이용하여 원하는 수준의 센싱 커버리지를 얻을 수 있도록 한다. 두 노드 사이의 거리는 센싱영역과 중첩되는 영역 안에 존재하는 노드의 개수를 이용하여 확률적인 방법으로 구하게 되며, 이렇게 측정된 거리를 이용하여 세 원에 의해 생성되는 삼각형의

넓이를 구하고 삼각형 내에서 이 노드들에 의해 커버되지 않는 영역을 차감함으로써 지역적으로 원하는 수준만큼의 센싱 커버리지를 보장할 수 있는지 확인하게 된다. 이러한 과정을 통해서 사용자가 요구하는 수준의 센싱 커버리지 이상으로 커버할 수 있다면 이제 노드는 깨어나게 되고 그렇지 않을 경우에는 다른 노드의 세트를 찾게 된다. 이 프로토콜은 거리정보만을 이용하여 사용자가 원하는 수준만큼의 센싱 커버리지를 얻을 수 있지만 영역의 계산에 있어서 예외의 경우가 다수 존재하고 노드의 밀도가 높을 때만 제대로 작동할 수 있다는 문제점이 있다.

III. Wake-up 스케줄링 프로토콜

본 장에서는 무선 센서 네트워크가 구성된 관심지역에서 응용이 요구하는 센싱 커버리지를 제공하면서 효율적으로 각 노드에서 wakeup 스케줄링을 할 수 있는 프로토콜에 대해서 기술한다.

3.1 스케줄링 프로토콜 기본동작

제안된 프로토콜은 충분히 많은 수의 센서 노드들이 구성되어 있는 무선 센서 네트워크에서 응용이 요구하는 센싱 커버리지 수준을 유지하면서 동작하는 노드들의 수를 최소화한다. 이 때 노드의 상태는 노드 스스로 결정하는 완전히 분산된 방식을 따른다. 이를 위해 각 노드는 세 가지 상태(probing, working, sleeping)를 가진다. 그림 1은 센서 노드의 상태변화 다이어그램을 나타낸 것이다.

네트워크 운용 초기에 모든 노드들은 sleeping 상태를 유지한다. 네트워크 운용이 시작되면 임의의 시간이 지난 뒤 노드는 probing 상태로 전환한다. probing 상태로 전환된 노드는 probing 메시지를 브로드캐스팅한다. probing 메시지를 전송한 후 일정시간, T_p , 동안 기다린 후 probing 메시지에 대한 응답이 없으면 자신의 주변에는 어떤 노드도 working 상태에 있지 않다고

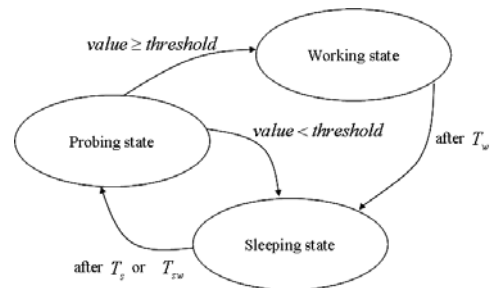


그림 1. 센서 노드의 상태변화 다이어그램

판단하여 자신의 상태를 working 상태로 전환한다. working 상태로 전환된 노드는 자신의 working 시간, T_w , 을 정하고 working 시간동안 자신의 센싱범위 내에서 발생하는 이벤트에 대한 정보를 수집한다. 이 때, 센서 네트워크 내에서 각 노드들이 에너지를 균등하게 사용하게 하기 위해 각 노드의 working 시간, $T_w(i)$, 는 아래의 식 (1)과 같이 구할 수 있다.

$$T_w(i) = T_{\max} \left[\alpha \left(1 - \sqrt{\frac{E_c(i)}{E_{\text{init}}(i)}} \right) + \beta \right] \quad (1)$$

여기에서 T_{\max} 는 미리 정해진 최대 working 시간을 나타내며, $E_{\text{init}}(i)$ 는 센서 노드에 할당된 최초 에너지 레벨이고, $E_c(i)$ 는 노드 i 의 현재 보유하고 있는 에너지 레벨을 나타낸다. α 와 β 는 시스템 파라미터이며 그 값은 $(\alpha + \beta = 1)$ 이다. 식 (1)에 의해 구해진 각 노드의 working 시간, $T_w(i)$, 는 남은 에너지양이 많은 노드들은 긴 시간동안 working 하여 많은 에너지를 소모하게 하고 남은 에너지가 적은 노드들은 β 값에 따라 최소한의 working 시간을 보장하게 함으로써 각 노드들의 에너지 소모를 균등하게 하는 동시에 일정시간 동안의 working 시간을 보장하여 프로토콜의 성능을 높인다.

만약 probing 메시지를 보낸 노드의 주변에 working 상태에 있는 노드가 존재한다면 working 노드는 probing 메시지에 대해 reply 메시지로 응답한다. reply 메시지에는 노드 아이디, 에너지 레벨, 앞으로의 남은 working 시간 등이 포함되어 있다. reply 메시지를 받은 노드는 reply 메시지 내에 포함되어 있는 정보를 이용하여 자신의 동작여부를 판단한다. 자신의 동작여부를 판단하기 위해서는 다음 장에서 설명하는 wake-up 스케줄링 프로토콜을 따른다. 이웃 노드로부터 수집한 정보와 미리 정해진 동작여부 기준치를 바탕으로 working 상태 또는 sleeping 상태로 전환한다. sleeping 상태로 전환한 노드는 미리 정해진 sleeping 시간, T_s , 또는 이웃 노드의 남은 working 시간, T_{sw} , 후에 다시 probing 상태로 전환한다.

3.2 유효 센싱범위에 의한 스케줄링 프로토콜

ESP (Effective sensing area based Scheduling Protocol) 프로토콜은 유효 센싱범위를 고려하여 노드의 wakeup 스케줄링을 결정한다. 유효 센싱범위 (ESA: Effective Sensing Range) 란 노드가 센싱 하는 동안 자신의 센싱범위와 이웃 노드의 센싱범위가 중복되지

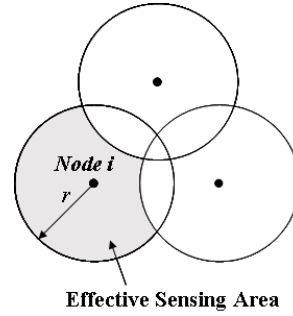


그림 2. 노드 i 의 유효 센싱범위

않고 자신에 의해 순수하게 커버되는 지역을 말한다. 그림 2는 노드 i 의 유효 센싱범위를 나타낸다.

이 때, $S(i)$ 를 노드 i 의 센싱범위, $d(i, j)$ 를 노드 i 와 j 의 거리, r_i 은 노드 i 의 센싱거리, $N(i) = \{j \in N | d(i, j) \leq 2r_i, j \neq i\}$ 로 정의되는 이웃노드들의 집합이라고 하면 노드 i 의 유효 센싱범위는 식 (2)과 같이 표현 할 수 있다.

$$ESA(i) = S(i) - \left(\bigcup_{j \in N(i)} S(i) \cap S(j) \right) \quad (2)$$

두 개의 노드가 중복되어 센싱 하는 경우 (2-중복), 유효 센싱범위는 두 노드간의 상대 거리만으로 간단하게 계산 할 수 있지만 세 개 이상의 노드가 중복되는 경우 (3-중복 이상)에는 유효 센싱범위를 계산하는 과정 동안 다수의 삼각함수와 제곱계산이 필요하기 때문에 계산 복잡도가 2-중복일 때보다 상대적으로 높아지게 된다. 따라서 유효 센싱범위를 계산하는 식은 복잡하기 때문에 본 논문에서는 나타내지 않는다.

유효 센싱범위는 노드의 센싱거리에 따라 달라지므로 노드의 작동여부 결정 단계에서 기준치 와 비교하기 위해서는 정규화 시켜주어야 한다. 정규화는 자신의 센싱범위에서 ESA가 차지하는 비율 $\psi(i)$ 로 나타내며 식 (3)과 같이 계산될 수 있다.

$$\psi(i) = \frac{ESA(i)}{\pi r_i^2} \quad (3)$$

노드는 자신의 동작여부를 판단하기 위해 $\psi(i)$ 와 미리 정해진 기준치와 비교하여 크거나 같을 경우에는 working 상태로 전환하여 센싱임무를 수행하게 되고 작으면 sleeping 상태로 들어간다.

3.3 가중 평균거리에 의한 스케줄링 프로토콜

WAD (Weighted Average Distance) 프로토콜은 노드의 wakeup 스케줄링을 결정하기 위해 중복되어 센싱

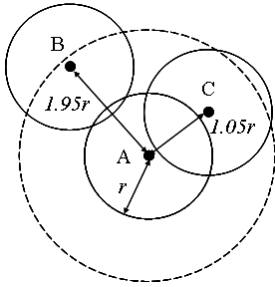


그림 3. 노드 스케줄링을 위한 중복면적의 예

하는 이웃 노드들과의 상대거리에 대한 가중 평균값을 이용한다. 만약 이웃 노드들과의 상대거리에 대한 가중 평균값이 미리 정한 기준치보다 크면 중복이 적게 일어나는 것으로 판단하여 해당 노드는 working 상태로 들어가고, 기준치보다 작으면 에너지 보존을 위해 sleeping 상태로 들어간다.

가중 평균거리를 사용하는 하는 이유는 다음과 같다. 단순한 산술 평균거리는 노드의 활동 여부 판단에 있어서 그대로 적용하기에는 오차발생 가능성이 크다는 문제점을 가지고 있다. 왜냐하면 어떤 노드가 다른 노드의 통신범위의 경계 부근에 있어서 센싱영역의 중복 정도가 미미하다고 할지라도 실제로 산술평균의 계산에 있어서는 영향력을 미쳐서 중복의 정도에 비해 평균거리 값에 큰 영향을 미치기 때문이다.

그림 3의 예를 살펴보면 노드 A가 노드 B, C와 이루는 실제 중복면적은 노드 A의 센싱영역에 대해 약 36%이다. 하지만 산술 평균거리로 계산했을 경우에는 중복면적이 28%로 실제의 중복면적과는 차이를 보이게 된다. 따라서 이러한 경우에는 이웃 노드들의 중복 형태에 따라서 산술 평균거리에 의한 중복 정도와 실제 중복 정도가 많은 차이를 보이기 때문에 정확한 상황을 반영하여 노드의 상태를 결정하기 어렵게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 산술평균 대신에 가중 평균을 사용한다. 가중평균은 중요도나 영향 정도에 해당 하는 값을 원래의 값에 곱하여 구하는 평균으로써 본 논문에서는 다음과 같이 이웃 노드의 상대거리에 대한 가중 평균거리, $D_w(i)$,를 식 (4) 과 같이 구할 수 있다.

$$D_w(i) = \frac{\sum_{j=1}^n d(2r-d)^k}{\sum_{j=1}^n (2r-d)^k} \quad (4)$$

여기에서 i 는 노드 자신을 나타내고, j 는 이웃노드를 나타낸다. d 와 r 은 각각 두 노드 사이의 상대거리

와 센싱거리를 나타낸다. 그리고 k 는 가중치에 대한 승수로 k 값에 의해 상대거리가 증가함에 따라 가중치가 급격하게 줄어들게 되어 영향도가 낮은 노드에 대해서는 상대적으로 더 큰 불이익을 부여한다. 그림 3의 예를 살펴보면 식 (4)에 의해 구해진 가중 평균거리에 의한 값으로 중복면적을 구해보면 센싱영역의 약 34%로써 실제와 유사한 값이 나온다는 것을 알 수가 있다.

가중 평균거리를 이용하면 간단한 수식으로 중복면적이 계산이 가능하여 ESP 프로토콜에 비해 계산 복잡도가 획기적으로 줄어들게 된다. 또한 가중 평균거리를 구하는데 있어서 주변 노드에 대한 거리정보만을 필요로 하므로 ESP에서와 같이 각 노드는 자신의 위치를 정확하게 알고 있어야 한다는 가정을 피할 수 있다. 왜냐하면 두 노드 사이의 거리는 RSSI를 이용하여 구하거나 확실적인 방법으로 구할 수 있기 때문이다^[11]. 따라서 가중 평균거리를 사용하게 되면 GPS 같은 위치 측정 장비를 사용하지 않고도 센서 노드는 자신의 상태를 결정할 수 있게 된다.

3.4 가변 기준치

본 논문에서 제안하는 wakeup 스케줄링 프로토콜의 장점 중 하나는 노드의 상태를 판단하는 기준치의 조정을 통해서 원하는 수준의 커버리지 서비스를 제공하는데 있다. 왜냐하면 네트워크 운용 초기에는 미리 정해진 기준치를 만족시키는 노드들이 다수 존재하여 요구하는 커버리지 수준을 제공할 수 있지만 시간이 흐름에 따라 미리 정해진 기준치를 만족시키는 노드들이 점점 사라지기 때문에 요구하는 커버리지 수준을 제공할 수 없게 된다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 네트워크 상황에 따라 노드의 상태를 판단하는 기준치가 동적으로 변하는 가변 기준치를 제안한다.

가변 기준치는 커버리지 수준에 따라 노드의 상태를 판단하는 기준치를 낮춤으로써 더욱 많은 노드들이 동작할 수 있도록 하며, 각 노드들은 중복되는 이웃 노드들의 에너지 수준을 고려하여 새로운 기준치를 설정한다. 네트워크 상황에 따라 각 노드에서 새로 설정되는 기준치, $th_{\neq w}(i)$,는 식 (5) 와 같이 설정할 수 있다.

$$th_{\neq w}(i) = th_{init}(i) - \sigma \left[th_{init} \left(1 - \frac{E_{nbr_avg}(i)}{E_{init}(i)} \right) \right] \quad (5)$$

여기에서 $th_{init}(i)$ 는 네트워크를 시작할 때 정해진

기준치이고, $E_{init}(i)$ 는 각 노드의 최초 에너지 레벨이며, $E_{nbr_avg}(i)$ 는 노드 i 의 이웃 노드의 평균 에너지 레벨을 나타낸다. σ 는 시스템 파라미터로서 가변 기준치의 변화폭을 조정할 수 있으며 그 값은 $0 \leq \sigma \leq 1$ 이다.

가변 기준치를 이용하면, 고정된 기준치를 사용할 때보다 동일한 수준의 커버리지 서비스를 보다 긴 시간 동안 제공할 수 있다. 그러나 가변 기준치에 대한 효과는 시간이 지남에 따라 약해지게 된다. 따라서 어느 정도의 시간이 지나게 되면 동일한 수준의 커버리지 서비스를 제공하도록 하기 위해서 가능한 많은 노드들이 깨어날 수 있도록 해야 한다. 따라서 본 논문에서는 가능한 많은 노드들이 작동할 수 있도록 부스트 포인트 (Boost point)라는 것을 둔다. 부스트 포인트는 노드들이 무조건 깨어나서 동작하는 지점으로 가변 기준치를 정할 때와 같이 주변 노드들의 평균 에너지 레벨을 고려한다. 부스트 포인트에 의해 각 노드는 다음과 같이 동작하게 된다.

$$th(i) = \begin{cases} th_{\neq w}(i), & \text{if } E_{nbr_avg}(i) \geq \delta \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

이 때, 부스트 포인트는 $0 \leq \delta \leq E_{init}(i)$ 값을 갖는다.

IV. 성능평가

4.1 실험 환경

본 논문에서는 모의실험을 통하여 제안된 프로토콜의 성능평가를 수행하였다. 표 1은 모의실험에 사용된 파라미터 값을 보여준다. 실험에서 설정된 센서지역의 크기는 $200m \times 200m$ 이며, 센서 노드의 수는 200개이다. 센서 노드는 지역 내에 랜덤하게 배치되고 이동성은 없으며 각 노드의 센싱거리는 $20m$ 이다. 각 모의실험은 배치된 모든 노드가 에너지를 완전히 소비할 때까지 진행되며 각 노드들의 상태는 1 단위시간(unit time) 만큼 지난 후에 기록이 이뤄진다. 노드들은 최초 5 단위전력의 에너지 레벨을 가지고 있으며 working 상태이면 각 단위시간 마다 하나의 단위전력만큼 소비하고 sleeping 상태에서는 에너지 소비가 없다. 메시지 송/수신 및 데이터 처리에 대한 전력소비량은 고려하지 않았다. 정확한 데이터를 획득하기 위해서 모의실험은 모든 경우에 대해 다른 종자(Seed)값을 사용하여 각각 30회씩 실시하였고, 평균값이 그래프에 표시되었다.

표 1. 모의실험을 위한 파라미터 설정

| 파라미터 | 값 |
|-----------------------------|--------------------------|
| 센서지역의 크기 | $200m \times 200m$ |
| 노드의 수 | 200 |
| 센싱거리 | $20m$ |
| 초기 에너지 레벨 (E_{init}) | 5 (unit power/unit time) |
| 최대 working 시간 (T_{max}) | 1 (unit time) |
| $\alpha / \beta / k$ | 0.8 / 0.2 / 1 |

4.2 성능결과

그림 4는 시간의 변화에 따른 ESP, WAD의 센싱 커버리지를 나타낸다. 두 프로토콜 모두 90%의 센싱 커버리지 수준을 목표로 하여 기준치를 설정하였다. ESP의 경우, 기준치는 전체 센싱범위에 대한 유효 센싱범위의 비율을 나타낸다. 한편, WAD의 경우, 기준치는 거리에 대한 비율이 된다. 즉, 기준치 100%가 의미하는 바는 가중 평균거리가 두 노드 사이의 최대 거리인 노드 센싱거리의 2배이고, 기준치 0%는 두 노드가 동일한 위치에 있다는 것을 의미한다. 앞에서도 설명했지만 주어진 조건에 따라서 기준치와 센싱 커버리지 수준사이의 관계는 달라지므로, 각 프로토콜들은 90%의 센싱 커버리지를 얻기 위해 서로 다른 기준치를 사용하였다. 그림 4에서 보는 바와 같이 두 프로토콜 모두 모의실험의 중반부까지 동일한 센싱 커버리지를 갖는 것을 볼 수 있다. 특히, 네트워크의 수명을 작은 수준의 오차(1%)를 허용하는 동일한 수준의 센싱 커버리지가 지속적으로 유지되는 시간이라고 했을 때, 두 프로토콜의 네트워크 수명은 12 단위시간으로써 모두 동일하다는 것을 알 수 있다. 따라서 가중 평균거리를 이용하여 노드의 wakeup 스케줄링을 판단하더라도 성능의 저하 없이 정확한 위치를 이용한 ESP와 유사한 성능을 보인다. 또한, WAD의 경우 노드 상태에 대한 판단과정이 매우 단순하기 때문에 계산 복잡도에 대한 부하의 감소로 실제 상황에서는 센서 노드

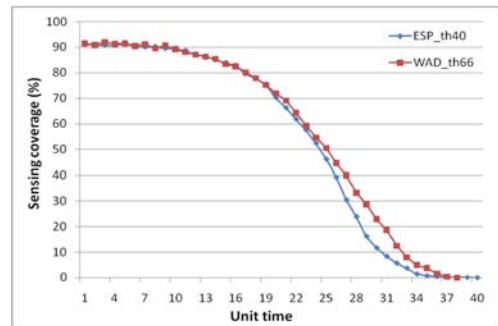
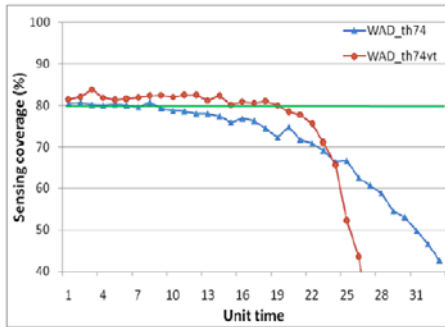


그림 4. 시간에 따른 센싱 커버리지 변화

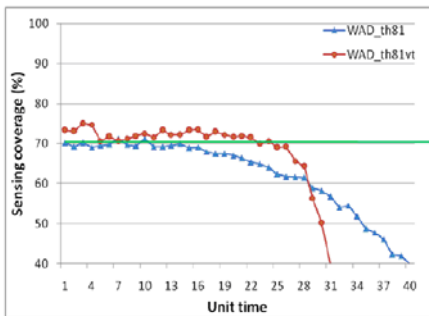
의 수명을 더욱 향상시킬 수 있을 것이라 예상할 수 있다.

가변 기준치의 효과를 알아보기 위해 WAD 프로토콜에 가변 기준치를 적용하여 모의실험을 실시하였다. 모의실험에서 σ 와 δ 의 값을 각각 0.1과 0.4로 설정하였다. 따라서 기준치는 최대 -10%까지 변화될 수 있고 중복되는 노드들의 에너지 수준이 40% 미만으로 떨어지게 되면 probing 상태의 노드는 working 상태로 들어간다.

그림 5의 (a)를 살펴보면, 고정된 기준치를 사용한 경우에 단위시간 9를 기점으로 하여 시간이 지날수록 센싱 커버리지 수준이 지속적으로 감소하는 것을 볼 수 있다. 반면에, 가변 기준치를 적용한 경우에는 단위시간 19때까지 원래 목표했던 80%이상의 센싱 커버리지 수준을 지속적으로 유지하는 모습을 볼 수 있다. 요구 센싱 커버리지 수준이 70%인 (b)의 경우에도 같은 효과가 나타나며, 두 경우 모두 원래 목표로 했던 센싱 커버리지를 가변 기준치를 사용하지 않았을 때보다 2배 이상 시간동안 유지시킬 수 있음을 확인할 수 있었다. 가변 기준치를 통해서 동일한 수준의 센싱 커버리지를 더욱 오랫동안 유지할 수 있는 이유는 기



(a) Required sensing coverage = 80%



(b) Required sensing coverage = 70%

그림 5. 가변 기준치의 효과 (WAD, $\sigma=0.1$, $\delta=0.4$)

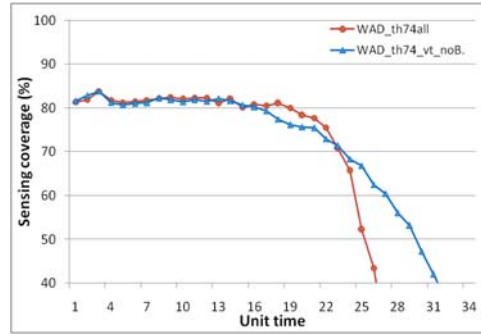


그림 6. 부스터 효과 (WAD, $\sigma=0.1$, $\delta=0.4$)

준치가 지속적으로 감소함에 따라 기준보다 많은 노드들이 깨어날 수 있는 기회를 갖게 되고 전체적으로 모든 노드가 균등하게 에너지를 소비하기 때문이다.

가변 기준치의 효과는 시간이 지날수록 약해지게 된다. 왜냐하면, 시간이 지나서 많은 노드들의 에너지가 고갈되면 깨어나서 센싱 커버리지를 늘려줄 수 있는 노드의 절대적인 수가 부족해지기 때문이다. 따라서 이러한 경우에는 부스터 포인트를 설정해서 기준치와는 상관없이 가능한 많은 노드들이 깨어나도록 해야 한다. probing 상태에서 상태를 판단하는 노드는 중복되는 이웃노드들의 에너지 수준의 파악하여 그에 대한 평균값이 부스터 포인트 미만으로 떨어지게 되면 무조건 깨어나서 working 상태로 들어가게 된다. 따라서 계산된 기준치에 의해 깨어나야 하는 노드보다 더 많은 수의 노드가 깨어날 수 있게 되는 것이다. 그림 6에서 보면 부스터 포인트를 설정하지 않은 경우에는 단위시간 15를 기점으로 센싱 커버리지 수준이 감소하기 시작하지만 부스터 포인트를 사용한 경우에는 단위시간 까지 19까지 요구하는 수준의 센싱 커버리지가 유지되는 것을 볼 수가 있다.

응용에서 원하는 수준의 센싱 커버리지를 얻기 위해서 센서 네트워크가 작동하기 이전에 기준치를 미리 정해 주어야 한다. 기준치에 따라서 획득되는 센싱 커버리지는 정해져 있기 때문에 적절한 기준치를 정해 줌으로써 사용자는 원하는 수준의 센싱 커버리지를 얻을 수 있다. 그러나 기준치와 센싱 커버리지 사이의 관계는 결정론적(deterministic) 방법으로 정해지기 어렵다. 왜냐하면 어떤 기준치를 설정했을 때 얻을 수 있는 센싱 커버리지는 주어진 조건에 따라 변하기 때문이다. 즉, 어떤 조건이 주어지게 되면 그 조건에서만 만족될 수 있는 둘 사이의 관계가 존재하게 되는데, 이러한 조건에는 배치된 노드의 수, 노드의 배치 형태, 관심지역의 형태, 그리고 적용된 작동여부 결정

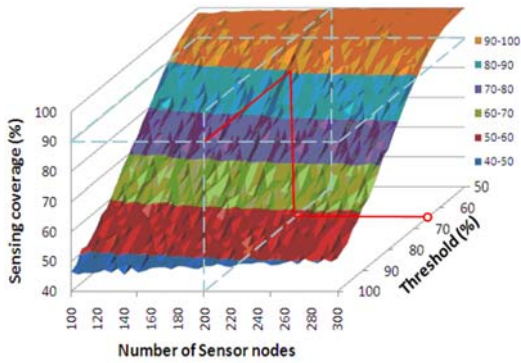


그림 7. WAD 프로토콜 참조 그래프

방법 등이 될 수 있다. 이러한 조건들은 사용자의 요구 및 상황에 따라 달라 질 수 있기 때문에 기준치와 센싱 커버리지 관계를 하나의 함수로 표현하는 것은 어려운 일이라고 할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 이런 상관관계를 고려하여 그림 7과 같은 참조 그래프 (Reference graph)를 제공한다.

그림 7은 200m×200m의 지역에 100개부터 300개의 노드가 배치되었을 경우, 기준치와 센싱 커버리지 관계를 나타낸 참조 그래프이다. 그래프는 센싱 커버리지, 노드의 수, 기준치의 세 변수가 주어졌을 때 얻어지는 결과를 이용하여 작성되었다. 예를 들면, 관심 지역에 200개의 센서 노드를 배치하였을 때, 90%의 센싱 커버리지 수준을 원한다면 기준치를 0.7로 정해면 된다. 가변 기준치를 이용할 경우에도 최초로 얻어지는 센싱 커버리지가 네트워크의 수명이 다할 때까지 거의 동일하게 유지되므로 최초의 값만으로도 세 변수간의 관계를 나타내어도 같은 성능을 나타낸다.

V. 결 론

무선 센서 네트워크에서 한정된 에너지를 효율적으로 사용하는 것은 가장 중요한 설계 고려사항 중 하나이다. 그동안 많은 연구들이 노드의 에너지 사용을 줄이기 위해 진행되어 왔으며, 특히 노드의 wakeup 스케줄링을 통한 기법들이 주요한 프로토콜로 제시되고 있다. 그러나 기존의 프로토콜들은 센서 네트워크의 기본 목표인 관심지역의 센싱 커버리지 문제를 간과하였다. 응용에서 요구하는 커버리지 수준을 제공하지 못한다면 노드 스케줄링에 의해 에너지를 사용을 줄이는 것은 아무런 의미가 없게 된다. 따라서 무선 센서 네트워크를 위한 프로토콜을 설계할 때에는 반드시 커버리지 문제도 고려해야 한다.

이런 관점에서, 본 논문은 무선 센서 네트워크에서 각 노드의 센싱범위가 중복되는 것을 최소화하면서 응용에서 요구하는 센싱 커버리지를 유지하고, 에너지 효율적인 wakeup 스케줄링 프로토콜을 제안한다. 제안한 기법은 응용 혹은 사용자의 요구에 부합하는 수준의 센싱 커버리지를 얻을 수 있도록 해주며, 필요한 노드의 수를 최소화하여 네트워크 수명을 연장하였다. 기존에 소개되었던 ESP 프로토콜에 비해 노드의 작동여부를 판단하는데 복잡한 계산을 필요로 하지 않고, 각 노드가 자신의 위치를 알고 있어야 한다는 가정을 했던 것과는 달리 제안된 기법에서는 이웃노드와의 상대 거리정보만을 필요로 한다. 또한 가변 기준치를 이용하여 노드가 작동여부를 판단하는 기준치를 동적으로 변화시켜 같은 수준의 센싱 커버리지를 더욱 오랫동안 제공할 수 있었다.

본 논문의 결과는 향후 무선 센서 네트워크에서의 wakeup 스케줄링 및 커버리지 서비스를 제공하기 위한 프로토콜을 설계하는데 좋은 지침이 될 것으로 예상되며, 향후에는 수학적 분석을 통해 결정론적 방법으로 요구되는 센싱 커버리지 수준을 제공하는 wakeup 프로토콜을 제안할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "A Survey on Sensor Networks," *IEEE Communications Magazine*, Vol.40, No.8, August 2002.
- [2] D. Ganesan, A. Cerpa, W. Ye, Y. Yu, J. Zhao, and D. Estrin, "Networking Issues in Wireless Sensor Networks," In *Journal of Parallel and Distributed Computing (JPDC)*, July 2004.
- [3] I. Howitt, J. Wang, "Energy balanced chain in distributed sensor networks," In *Proc. IEEE WCNC 2004*, March 2004.
- [4] J.Hui, Z. Ren, B.H. Krogh, "Sentry-based Power Management in Wireless Sensor Networks," In *Proc. Second International Workshop on Information Processing in Sensor Networks (IPSN'03)*, 2003.
- [5] M. Cardei, M. Thai, Y. Li, W. Wu, "Energy-efficiency target coverage in wireless sensor networks," In *Proc. IEEE Infocom 2005*, March 2005.
- [6] J. Cho, G. Kim, T. Kwon and Y. Choi, "A Distributed Node Scheduling Protocol Considering

Sensing Coverage in Wireless Sensor Networks,” In Proc. IEEE VTC 2007-Fall, September 2007.

- [7] A. Abdalkarim, F. Thorsten, D. Falko, “Adaptive Distance Estimation and Localization in WSN using RSSI Measures,” In Proc. Digital System Design Architectures, Methods and Tools, 2007 (DSD 2007), August 2007.
- [8] F. Ye, G. Zhong, S. Lu, and L. Zhang, “PEAS: A Robust Energy Conserving Protocol for Long-lived Sensor Networks,” In Proc. The 23rd International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS’03), May 2003.
- [9] C. Gui, P. Mohapatra, “Power Conservation and Quality of Surveillance in Target Tracking Sensor Networks,” In Proc. Mobicom, 2004.
- [10] D. Tian and N. D. Georganas, “A Coverage-Preserving Node Scheduling Scheme for Large Wireless Sensor Networks,” In Proc. ACM Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications, October 2002.
- [11] M. Zhang, M.C. Chan and A.L. Ananda, “Coverage Protocol for Wireless Sensor Networks Using Distance Estimates,” In Proc. IEEE SECON, June 2007.

조 재 규 (Jaekyu Cho)

정회원

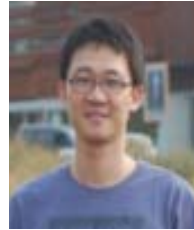


1994년 2월 금오공과대학교 공학사
 2004년 1월 국방대학교 전산정보학과 석사
 2008년 8월 서울대학교 컴퓨터공학과 박사
 <관심분야> 센서 네트워크, 무선 이동 통신

선 이동 통신

김 길 수 (Gilsoo Kim)

정회원



2003년 3월 육군사관학교 공학사
 2008년 2월 서울대학교 컴퓨터공학과 석사
 <관심분야> 센서 네트워크, 무선 이동 통신

권 태 경 (Taekyoung Kwon)

정회원



1993년 2월 서울대학교 컴퓨터공학과 졸업
 1995년 2월 서울대학교 컴퓨터공학과 석사
 2000년 2월 서울대학교 컴퓨터공학과 박사
 2002년 3월~현재 서울대학교

전기컴퓨터공학부 교수

<관심분야> 센서네트워크, 유비쿼터스 컴퓨팅

최 양 희 (Yanghee Choi)

종신회원



1975년 2월 서울대학교 전자공학과 졸업
 1977년 2월 한국과학기술원 석사
 1984년 2월 프랑스 ENST 전산학 박사
 1991년 3월~현재 서울대학교

전기컴퓨터공학부 교수

<관심분야> 미래 인터넷, 멀티미디어 통신