

# 무선 센서망의 수명 연장을 위한 센서 재배치

정회원 유영환\*

## Mobile Sensor Relocation to Prolong the Lifetime of Wireless Sensor Networks

Younghwan Yoo\* *Regular Member*

요약

최근 들어 무선 센서망은 저렴한 가격과 망 구성의 용이함 덕분에 많은 관심을 끌고 있다. 특히, 사람들이 직접 센서를 설치할 수 없는 재난 지역이나 위험 지역에 공중에서 센서를 뿌리는 것만으로도 망을 구성할 수 있다는 것은 상당히 중요한 장점이다. 하지만, 공중에서 센서를 흘뿌려 망을 설치하는 경우 센서들이 최적의 장소에 설치될 수가 없는데, 이는 최적의 위치에 설치된 센서망에 비해 더 많은 에너지의 사용, 그에 따른 수명의 단축 등 상당한 성능 저하를 감수해야 한다. 게다가 센서들이 계획적으로 설치된 망과는 달리 임의로 설치된 경우에는 센서들의 감지 영역에 포함되지 못하는 부분들이 생길 수 있다. 이 논문에서는 감지 영역을 벗어난 지역으로 이동 가능한 센서들을 움직여 전체 망의 감지 능력을 향상시키는 센서 재배치 방법을 제안한다. 실험 결과, 이 논문의 제안 방법이 기존 방법들에 비해 넓은 감지 능력과 센서망의 수명 향상을 가져오는 것으로 확인되었다.

**Key Words** : coverage, mobile sensor, relocation, sensing

ABSTRACT

The Wireless Sensor Network (WSN) has recently attracted considerable attention due to the low price and ease to deploy it. In particular, in a hostile or harsh regions where sensors cannot be deployed manually, WSNs can be established just by dropping sensors from the air. In this case, however, most likely sensors are not placed at optimal positions, although the location of sensors does have a drastic impact on the WSN performance. Moreover, randomized deployment algorithm can leave holes in terms of coverage in the sensing area. This paper proposes a sensor relocation scheme where mobile sensors move to patch up the holes by appropriate coverage. Simulation results show that the proposed algorithm outperforms prior existing schemes in terms of coverage and lifespan of WSNs.

### I. 서론

무선 센서망(Wireless Sensor Network; WSN)은 근래 학계와 산업계 등에서 지대한 관심을 끌고 있으며, 온도, 습도, 대기 오염, 소음 등 다양한 환경 요인들을 지속적으로 감지하는 데 널리 사용되고 있다. 이런 센서망의 인기는 센서의 낮은 가격과 망

구성 간단함에 기인한다. 특히 센서들을 공중에서 흘뿌려 망을 구성할 수 있다는 특성은 위험 지역이나 오염 지역에 망을 구성하는 데 매우 유용하다.

다른 무선망의 경우와 마찬가지로, 센서망에서도 각 노드들의 위치는 감지 능력, 노드 간 통신 비용, 망의 수명, 자원 관리 효율성 등 망의 성능에 상당한 영향을 미친다. 일반적인 상황에서는 기존 논문

\* 본 연구는 2007년도 부산대학교 교내학술연구비(신입교수연구정착금)에 의한 연구임

\* 부산대학교 정보컴퓨터공학부 유비쿼터스 컴퓨팅 연구실(yomomo@pusan.ac.kr)

논문번호 : KICS2008-10-461, 접수일자 : 2008년 10월 20일, 최종논문접수일자 : 2009년 3월 12일

들에서 제안되어온 센서의 배치 알고리즘<sup>1,2)</sup>들을 이용하여 각 센서망의 목적에 부합하는 최적의 위치를 찾아 배치할 수 있지만, 이런 알고리즘들은 전투 지역이나 재해 지역 등 정확한 상황을 파악할 수 없는 곳에서는 정상적인 효과를 보일 수 없다. 대신 이러한 지역에서는 센서들을 공중에서 떨어뜨려 임의의 위치에 자리하게 하는데, 나무나 전깃줄, 언덕 등의 장애물 때문에 균일하게 흩어지지 못하고 어느 센서의 감지 가능 지역에도 포함되지 않는 부분이 나타날 수 있다. 또한, 어떤 건물의 내부 정보가 필요한 경우, 센서를 공중에서 떨어뜨려서는 센서를 건물 내에 위치시킬 수가 없기 때문에 건물 내부 감지 공백 지역(sensing coverage hole)으로 이동할 수 있는 이동 센서가 필요하다.

센서의 최초 배치 이후 잘못된 배치 계획이나 센서의 수명이 다해 발생하는 감지 공백 지역을 극복하려는 연구가 추가 센서를 배치하는 방법과 이동 센서를 재배치하는 두 가지 방향으로 진행되고 있다<sup>3)</sup>. 먼저, 추가 센서 배치 방법은 기존에 배치된 센서들로부터 망의 전반적인 상태에 대한 정보를 얻어 필요한 지역에 하나씩의 센서를 추가하는 방법이다. 반면, 이동 센서 재배치 방법은 모든 센서를 한번에 설치하되 감지 공백의 출현 사실을 감지한 경우 망에 존재하는 이동 센서를 이동시켜 감지 공백을 메우는 방법이다.

본 논문에서는 센서망의 수명 연장을 목적으로 하는, 에너지를 고려한 가상 힘 방법 (Energy-considered Virtual Force Algorithm: EVFA)이라는 이름의 이동 센서 재배치 방법을 제안한다. 일반적으로 기존의 방법들<sup>3-9)</sup>은 센서들 간의 간격 유지에 집중했다. 간격을 일정하게 유지하여 각 센서들의 감지 영역을 최대한 겹치지 않게 함으로써 전체 센서망의 감지 능력을 최대한으로 끌어올리려 했다. 하지만, 이들 방법들은 공통적인 개선점을 지니고 있는데, 각 센서의 잔여 에너지의 양이나 싱크와의 거리에 관계없이 동일한 넓이의 지역에 대한 감지를 담당하도록 했다는 것이다. 이 경우 에너지가 얼마 남지 않은 센서는 곧 수명이 다하게 되고, 망에 센서 공백을 발생시켜 다른 센서들의 추가적인 이동이 필요하게 된다. 또, 싱크와의 거리가 가까운 경우 각 센서로부터 싱크로 물리는 데이터의 중간 전송을 담당하느라 에너지 소모가 커질 확률이 높아 센서의 수명이 상대적으로 짧아지는 유사한 결과를 가져온다. 반면, 이 논문의 제안 방법인 EVFA에서는 각 센서가 담당하는 감지 영역의 넓이를 잔

여 에너지의 양, 싱크와의 거리에 비례하게 함으로써 에너지의 양이 부족했던 센서가 모든 에너지를 소모하고 망에서 탈락하더라도 다른 센서들의 추가 이동 거리가 상대적으로 짧아지게 한다.

이동 센서 재배치 방법을 설계하는 데 있어서 고려해야 할 성능 평가 항목이 많이 있다. 센서의 물리적 이동 거리, 데이터 전송 비용, 감지 공백 영역 복구 시간, 현재 망 위에서 동작하고 있는 응용프로그램에 미치는 영향, 개별 센서의 에너지 소모량과 망 전체적인 관점에서 본 에너지 소모량 간의 균형 등이 그것이다. 이들 중 물리적 이동이 센서의 에너지 소모의 대부분을 차지하므로<sup>1)</sup>, EVFA는 센서의 이동 거리를 줄이는 데에 초점을 맞춘다. 시뮬레이션을 통한 실험 결과는 EVFA의 효율성을 증명한다. 기존의 가상 힘 방법(Virtual Force Algorithm: VFA)과 비교하여 센서망의 감지 능력에 약간의 향상을 가져오면서도 많은 센서들의 수명이 더 오래 지속된다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 다음 장에서는 기존 연구들을 살펴보고, 3장에서 EVFA의 특징과 동작을 상세히 설명한다. 4장에서는 실험 결과를 서술하며, 5장에서 결론을 맺는다.

## II. 기존 연구

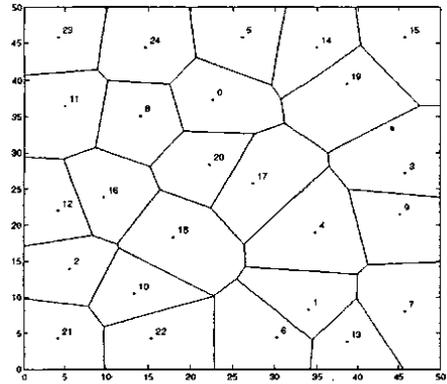
자석의 경우처럼 VFA<sup>14)</sup>의 센서들 사이에는 가상의 인력(attractive force)과 척력(repulsive force)이 존재한다. 정해진 기준 거리보다 멀리 떨어진 두 센서는 그 거리에 비례한 힘만큼 끌어당기고, 기준 거리보다 가까운 경우에는 두 센서간 거리에 반비례하여 밀어낸다. 하나의 센서에 작용하는 여러 센서로부터의 힘은 벡터로 표시되며, 싱크 노드가 이를 수집, 벡터합을 계산한 후 해당 센서에 최종 이동 위치를 알려준다. VFA는 중앙 집중형 알고리즘이기 때문에 싱크 한 부분이 문제를 일으킬 경우 망 전체가 심각한 영향을 받을 수 있다. 본 논문의 제안 방법이 VFA에 기반을 두고 있으므로, 이후 본 문서에서 보다 자세히 다룰 것이다.

중앙 집중형 방법의 문제점을 개선하기 위하여 벡터 기반 알고리즘(VEctor-based algorithm), 보로노이 기반 알고리즘(VORonoi-based algorithm), 최소최대 알고리즘(Minimax algorithm) 등의 세 가

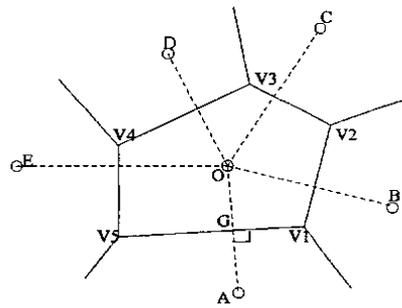
1) 센서의 패킷 전송 시 필요한 에너지가 약 0.1 Joule인데 반해, 1미터 이동하는 데 27.96 Joule의 에너지가 소모된다<sup>5)</sup>.

지 분산 알고리즘이 제안되었다<sup>[5]</sup>. 먼저, VEC은 VFA와 비슷하나 노드 간의 척력만 고려했다는 것이 차이점이며, 한 노드의 위치를 계산함에 있어 다른 노드뿐 아니라 감지 영역의 경계 지점이나 장애물과의 거리도 고려한다. 한편, VOR은 기하학의 중요 도형 중 하나인 보로노이 다각형(Voronoi polygon)<sup>[10,11]</sup>을 이용한다. 그림 1에서처럼 전체 감지 영역을 센서와 같은 수만큼의 다각형으로 나누어 각 다각형 내에 하나씩의 센서만 존재하도록 한다. 각 다각형은 내부의 센서와 이웃 센서를 이은 선분과 직각 이등분하는 선분들로 이루어지며, 이 선분들이 만나는 점을 보로노이 꼭지점(Voronoi vertex)이라고 부른다. 한 보로노이 다각형 내부의 모든 지점은 이웃 다각형의 어떤 센서보다 자신이 속한 다각형의 센서와 가까운 성질이 있기 때문에 각 센서는 자신의 감지 능력과 보로노이 다각형의 넓이를 비교하여 감지 공백 지역의 유무를 쉽게 검사할 수 있다. 만일 감지 공백 지역이 존재한다고 판단되면, 센서에서 가장 먼 보로노이 꼭지점과 센서 사이의 거리가 센서의 최대 감지 가능 거리와 일치하도록 센서를 이동시킨다. 마지막으로, Minimax 방법은 VOR과 매우 유사하지만, 보로노이 다각형 내에서 센서를 이동시키는 거리는 최소-최대 알고리즘을 사용하여 가장 먼 보로노이 꼭지점과 센서 사이의 거리가 최소가 되도록 한다. VOR 방법에서는 가장 먼 보로노이 꼭지점까지의 거리가 센서의 감지 가능 최장 거리와 일치했었다.

중앙 집중형 알고리즘과는 달리 분산 알고리즘에서는 망의 부분 장애가 전체에 영향을 미치지 않으며 각 노드가 주위 노드의 정보만을 이용하여 계산을 수행하기 때문에 모든 노드정보를 중앙 한 곳으로 모으기 위한 오버헤드도 없다. 반면, 전체 노드 정보를 모른 채 각 노드가 개별적으로 위치를 결정하므로, 옮겨 간 위치에서 새롭게 맞닥뜨린 노드 때문에 곧바로 다시 이동해야 하는 문제가 발생할 수 있다. 최종적으로 목적지에 도달할 때까지 노드들은 지그재그 운동을 지속하게 되므로, 모든 정보를 가지고 계산된 최종 목적지로 곧바로 이동할 수 있는 중앙 집중형 방법에 비해 노드의 잦은 이동으로 인한 에너지 낭비가 심각할 수 있다. 이런 문제를 해결하기 위해 프락시 기반 배치 방법(proxy-based sensor deployment)<sup>[6]</sup>이 제안되었다. 이 방법에서의 센서망은 다수의 고정 센서(static sensor)와 일부 이동 센서(mobile sensor)로 이루어져 있다고 가정한다. 초기에는 고정 센서들이 골고루 흩어져 있어서



(a) Voronoi diagram



(b) Voronoi polygon  $G_p(O)$  of point  $O$

그림 1. 보로노이 다이어그램과 센서 O의 다각형 예

감지 공백 영역이 생기지 않지만, 일부 센서가 고장이 나거나 에너지가 모두 소모되고 나면 이로 인해 생긴 공백 지역으로 이동 센서가 움직여 해당 지역의 감지를 담당하게 된다. 그러나 이동 센서들은 감지 공백 영역이 발견된 지역으로 실제로 움직이기 전에 새 위치로 이동한 후 곧바로 다시 다른 곳으로 이동해야 하는 않는지 검사한다. 이 검사는 계산된 새 위치에 가장 가까운 고정 센서가 이동 센서의 프락시 서버 역할을 담당하여, 자신이 가진 주변 정보에다 이동 센서가 실제로 이동해 왔다는 것을 가정하고 수행한다. 만일 이동 센서가 새 위치로 이동한 후 주변의 센서들 때문에 다시 움직여야 한다는 사실이 발견되면 고정 센서는 더 최신의 위치 주변에서 새로운 프락시 서버를 선정하고 자신의 역할을 넘겨준 후 이동 센서에는 새롭게 계산된 위치와 새 프락시 서버 정보를 전달한다. 이 과정이 반복되다가 이동 센서가 더 이상 움직일 필요가 없는 최종 위치가 결정되면 이를 이동 센서에 알려주고 이동 센서가 실제로 목적지를 향해 움직이게 된다.

위의 프락시 기반 방법은 중복 치료(multiple

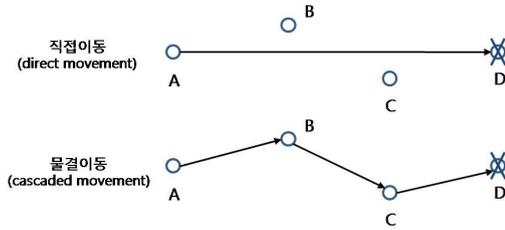


그림 2. 직접이동과 물결이동

healing) 문제 해결에도 효과가 있다. 중복 치료는 분산 알고리즘에서 발생할 수 있는 단점 중 하나로, 두 개 이상의 센서가 동시에 하나의 감지 공백 지역을 감지하고 같은 지역으로 이동하게 되는 경우를 말한다. 중앙 집중형 알고리즘에서는 서버에게서 명령을 받은 단 하나의 센서만이 이동하는 데 반해 분산 알고리즘에서는 불필요하게 다수의 센서가 이동하게 되므로 심각한 에너지 낭비를 초래한다. 이런 중복 치료 문제를 임의 지연(randomized-backoff delay)이라는 간단한 방법으로 해결한 연구<sup>7)</sup>도 있다. 각 센서는 새로 계산된 위치로 실제 이동하기 전에 임의의 시간을 기다린다. 시간이 지난 후 다시 검사하여 이전에 발견한 감지 공백 영역이 다른 센서의 감지 범위 내에 포함되었으면, 이 센서는 움직일 필요가 없다. 남은 에너지 양이 적은 센서가 더 오래 기다릴 확률을 높임으로써 센서 잔여 에너지 사이의 균형을 맞추는 효과를 얻을 수 있다.

Grid-Quorum<sup>18)</sup>과 SMART<sup>13)</sup>는 격자(grid) 또는 클러스터(cluster) 기반 알고리즘이다. Grid-Quorum에서는 전체 지역이 격자 구간으로 나누어져 있고, 각 구간은 격자 헤드(grid head)에 의해 관리된다. 자신이 속한 격자 구간에 감지 공백 지역이 존재하여 추가의 센서가 필요하다고 판단한 격자 헤드는 격자 헤드 간 통신을 통해 여분의 센서를 가진 격자 내 이동 센서에게 요청 메시지를 보낸다. 그러면 이동 센서는 요청 받은 격자까지 직접 이동(direct movement) 하거나 아니면 목적지까지 경로 중의 센서들과 함께 동시에 물결 이동(cascaded movement)을 하여 감지 공백 지역을 메운다. 직접 이동 방법은 간단하긴 하지만, 하나의 센서가 멀리 있는 새로운 격자까지 움직이는 데 많은 에너지를 소모하게 되며, 게다가 센서의 이동 속도가 비교적 느리므로 감지 공백을 복구하는 데 많은 시간이 소요된다. 한편, 물결 이동 방법에서는 여러 개의 센서가 동시에 짧은 거리씩 맡아 이동한다. 예를 들어 이동 센서 A가 감지 공백 지역까지 가기 위해 거쳐야 하는 격

자들에 이동 센서 B, C가 차례로 존재한다고 가정하자. 이 경우 센서 A, B, C가 동시에 움직여 A는 B가 있던 곳으로, B는 C가 있던 곳으로, 그리고 마지막 C는 감지 공백 지역으로 이동한다. 모든 센서가 동시에 움직이므로 복구 시간이 짧고, 에너지의 소모가 여러 센서에 골고루 분산되는 장점이 있다. 하지만, 그림 2의 예에서 보듯이 센서 B와 C가 센서 A의 원래 위치와 목적지를 잇는 직선 위에 존재하지 않는 한 전체적인 관점에서의 이동 거리는 물결 이동 방법이 직접 이동 방법보다 더 길다. 따라서, 전체적인 에너지 소모도 더 많다는 것을 알 수 있다.

Grid-Quorum 방법과 마찬가지로 SMART에서도 전체 영역을 격자형의 클러스터 집합으로 나누고 클러스터 헤드(cluster head)가 각 클러스터 내 센서 수를 조절한다. 이 방법은 모든 클러스터에 센서가 균등하게 존재하게 만드는 것을 목표로 하는데, 이를 위해 우선 가장 왼쪽 열의 클러스터 헤드들이 각자가 위치한 행에서 가로 방향으로 스캔 메시지를 전송한다. 이 메시지는 맨 오른쪽 클러스터에도 도착할 때까지 지나온 클러스터들의 센서 수를 누적하고, 출발점인 맨 왼쪽 클러스터로 되돌아오면서 누적값을 클러스터 수로 나눈 평균값을 각 클러스터 헤드들에게 알려준다. 평균보다 적은 수의 센서를 가진 클러스터의 헤드들은 메시지 교환을 통해 평균보다 많은 수의 센서를 가진 클러스터로부터 센서를 보충받는다. 가로 방향의 클러스터들끼리 센서 수가 다 일치하게 되면, 세로 방향으로도 같은 작업을 진행한다. 맨 위쪽 행의 클러스터 헤드들이 각자가 속한 열에서 세로 방향으로 스캔 메시지를 전송하고, 맨 아래 행으로부터 되돌아오는 메시지는 각 클러스터 헤드들에게 해당 열 클러스터들의 평균 센서 수를 알려준다.

한편, 셀의 밀도를 기반으로 한 배치 방법(cell-density based deployment method)과 센서 간 최장 거리 우선 배치 방법(longest inter-sensor distance first method)이 있다<sup>9)</sup>. 두 방법 모두 WSN 내에 일정 개수의 고정 센서와  $\lambda$ 개의 이동 센서가 있고, 싱크 노드는 센서들로부터 주기적으로 메시지를 받음으로써 각 센서의 위치를 알고 있다고 가정한다. 셀 밀도 기반 방법에서는 싱크가 전체 영역을 격자형의 셀로 나눈 후 각 셀에 존재하는 고정 센서의 수를 센다. 그 수가 작은 순서대로  $\lambda$ 개의 셀이 선택되어 각 셀 당 하나씩  $\lambda$ 개의 이동 센서를 배치한다. 한편, 센서 간 최장 거리 우선 방법에서는 모든 고정 센서 사이의 거리를 계산한 후 가장 멀리 떨

어진  $\lambda$ 개의 센서 쌍을 선택하여  $\lambda$ 개의 이동 센서를 그 센서들의 중간에 하나씩 배치한다.

마지막으로, 센서 노드를 배치하는 데 있어서 센서의 밀도 및 분포의 균일성 외에도 다양한 기후와 지형 등의 환경 요소를 고려하려는 시도가 있다. 논문 [12]에서는 여러 가지 지리적 또는 기상 환경 요소들이 센서의 성능에 미치는 영향을 분석하고, 이를 정량화하여 최적의 배치를 찾아내는 데 활용하고 있다.

### Ⅲ. 에너지를 고려한 가상 힘 방법 (Energy-considered Virtual Force Algorithm: EVFA)

#### 3.1 기존 VFA의 문제점

센서의 최초 배치 후 가상 힘 방법(VFA)<sup>[4]</sup>는 두 노드 사이의 거리 정보를 기반으로, 첫째, 두 개의 센서 사이에 인력이 존재하는지 척력이 존재하는지, 둘째, 그 힘의 크기가 어느 정도인지를 결정한다. 관련 연구에서 언급했듯이 두 노드 사이의 거리가 어떤 기준값  $d_{th}$ 보다 크면 둘은 서로 끌어당기고, 그렇지 않다면 서로를 밀어낸다. 그림 3은 모든 다른 센서들이 센서  $S_1$ 에 미치는 힘들을 보여준다. 이 그림에서 센서 둘레의 원은 센서가 어떤 사건의 발생을 감지할 수 있는 한계 영역을 나타내는데, 두 센서 간 거리의 기준값  $d_{th}$ 는 이 감지 한계 영역 반지름의 두 배와 같다.  $S_2$ 는  $S_1$ 으로부터  $d_{th}$  이상 떨어져 있으므로,  $\vec{F}_{12}$ 만큼의 힘으로  $S_1$ 을 끌어당긴다. 한편,  $S_3$ 은 기준거리보다 가까우므로  $S_1$ 을 밀어내고,  $S_4$ 는  $S_1$ 과의 거리가 기준거리와 동일하므로 아무런 영향을 미치지 않는다. 센서  $j$ 가 센서  $i$ 에 미치는 힘을 [4]에서는 다음과 같이 계산했다.

$$\vec{F}_{ij} = \begin{cases} (W_A (d_{ij} - d_{th}), \alpha_{ij}) & \text{if } d_{ij} > d_{th} \\ 0 & \text{if } d_{ij} = d_{th} \\ \left( W_R \frac{1}{d_{ij}}, \alpha_{ij} + \pi \right) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

$W_A$ 와  $W_R$ 은 각각 인력과 척력을 의미하고,  $d_{ij}$ 는 센서  $i$ 와 센서  $j$  사이의 거리,  $\alpha_{ij}$ 는 벡터의 방향을 나타낸다. 모든 벡터의 합에 따라 센서는 새로운 위치로 이동하게 된다. VFA는 중앙집중형 알고리즘이므로 모든 벡터 연산은 싱크에서 수행되며, 센서들은 싱크가 최종적으로 지정한 자리로 이동한다. 센서가 지그재그로 불필요하게 이동하는 것을 방지

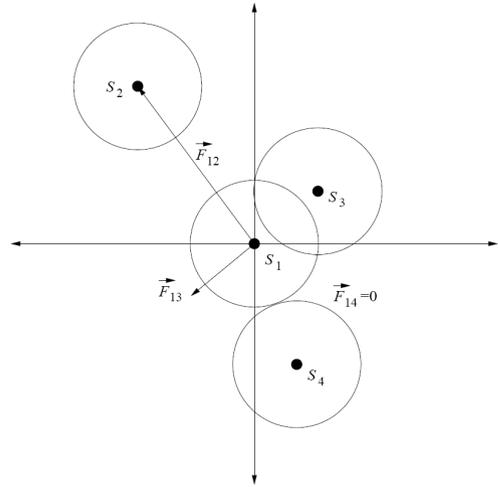


그림 3. 가상 힘 알고리즘 (Virtual Force Algorithm)<sup>[4]</sup>

하면서 센서망의 전체적인 감지 능력을 향상시키기 위해 VFA는 여러 라운드(round)로 반복된다.

그림 4는 VFA를 여러 번 반복 적용시켰을 때 무선 센서망 토폴로지의 예이다. 약간씩의 겹침 부분이 존재하지만, 각 센서들은 배타적인 감지 범위(exclusive sensing range)를 갖는다. VFA에서는 모든 센서가 같은 넓이를 담당하는 것으로 가정하기 때문에, 센서들은 이론적으로 다른 센서들에게서 같은 거리만큼 떨어져 있어야 한다. 그림 4에서 보면 실제로 센서들의 위치는 거의 균일 분포(uniform distribution)를 따르고 있다. 이런 VFA는 모든 센서들이 비슷한 양의 에너지를 가진 경우에는 좋은 성능을 보이지만, 잔여 에너지의 양이 크게 다른 경

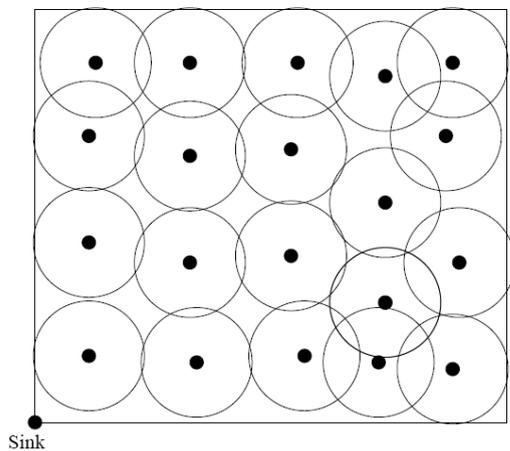


그림 4. VFA를 이용했을 때 각 센서의 감지 담당 범위

우에는 또다른 문제를 야기한다. 어떤 무선 센서망이 지금 막 한 라운드의 VFA를 수행한다고 가정하자. 잔여 에너지에 관계없이 모든 센서들은 가능한 한 서로 같은 거리만큼 떨어지게 된다. 그런데 만일 이 센서들 중 특정 센서의 잔여 에너지가 거의 남아있지 않았다면, 이 센서는 곧 수명이 다할 것이고, 이는 곧바로 새로운 라운드의 VFA를 필요하게 만들어 센서들을 또 다시 이동시킬 것이다.

### 3.2 EVFA와 VFA의 차이점

기존 방법의 이런 문제점을 개선하기 위해 본 논문에서 제안하는 에너지를 고려한 가상 힘 방법(Energy-considered Virtual Force Algorithm)에서는 잔여 에너지가 적은 센서들일수록 다른 센서들과 가깝게 위치하도록 하였다. 이렇게 함으로써 해당 노드의 수명이 곧 다하더라도 그로 인한 감지 공백 영역을 다른 노드들이 커버하기 위해 긴 거리를 이동하지 않아도 된다.

EVFA는 위에 언급한 차이점을 포함, 기존의 VFA와 다음과 같은 세 가지 큰 차이점을 갖는다.

- 1) 한 센서가 배타적으로 담당하는 감지 범위는 해당 센서의 잔여 에너지 양에 비례한다.
- 2) 한 센서의 배타적 감지 범위는 해당 센서와 싱크 노드와의 거리에 비례한다.
- 3) EVFA는 분산 알고리즘(distributed algorithm)이다.

첫 번째 항목에 대한 이유는 이미 설명했다. 두 번째 항목은 싱크에 가까운 센서일수록 에너지 소모 속도가 빠르다는 관찰에서 기인한다. 센서망에서의 데이터는 이벤트 발생을 감지한 소스로부터 싱크를 향해 흐르는 것이 일반적이기 때문에 싱크에 가까운 센서일수록 확률적으로 더 많은 데이터 패킷을 처리하게 된다. 많은 경우 데이터 집약(data aggregation)<sup>[13]</sup>을 통해 처리해야 할 패킷의 양을 어느 정도 줄여주긴 하지만, 이는 확실히 싱크에 가까운 센서들에게 오버헤드가 되므로, 싱크 주변에 더 많은 센서를 배치하여 이 부하를 분산시키고 개별 센서들의 수명을 연장할 수 있도록 하였다. 이 결과, 일부 센서들의 수명이 너무 빨리 다함으로 인해 이들이 담당했던 감지 지역을 커버하기 위해 다른 센서들이 이동해야 하는 연쇄 작용의 횟수를 줄일 수 있게 된다. 마지막으로, VFA에서는 모든 위치 벡터의 계산이 싱크에서 이루어지는 반면에, EVFA는 분산 알고리즘이기 때문에 싱크 노드에 대한 부하가 분산되고 단일 지점 고장(single point failure)

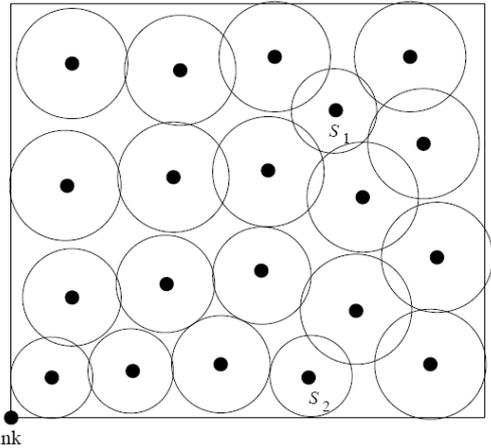


그림 5. EVFA를 이용했을 때 각 센서의 감지 담당 범위

문제가 발생하지 않는다.

그림 5는 EVFA에 의한 센서들의 위치를 나타낸 것이다. 최초 센서들의 위치는 그림 4의 경우와 동일하게 두고, EVFA를 10라운드 이상 적용하였다. 대체로 싱크에 가까운 센서일수록 더 작은 배타적 감지 영역(exclusive sensing range)을 갖게 되고, 센서 S<sub>1</sub>과 S<sub>2</sub>는 상대적으로 적은 잔여 에너지를 갖도록 설정했기 때문에 차지하는 지역도 작다.

### 3.3 EVFA 센서 간 기준 거리

VFA와 EVFA의 성능은 센서 사이의 기준 거리  $d_{th}$ 와 식 (1)의 입력과 척력인  $W_A$ 와  $W_R$  의해 결정된다. 만일,  $W_A$ 와  $W_R$ 이 고정된 값이라면 VFA와 EVFA의 성능의 차이는 온전히  $d_{th}$ 의 차이에서 오는 것으로 생각할 수 있다. 모든 센서가 동일한 감지 가능 거리를 갖는다고 가정할 때, VFA에서의  $d_{th}$ 는 그림 6에서 보듯이 단순히 감지 가능 거리의 두 배와 같다. 반면, EVFA에서의 기준 거리  $d_{th}$ 는 센서의 쌍마다 다른데, 그 이유는 두 센서 사이의

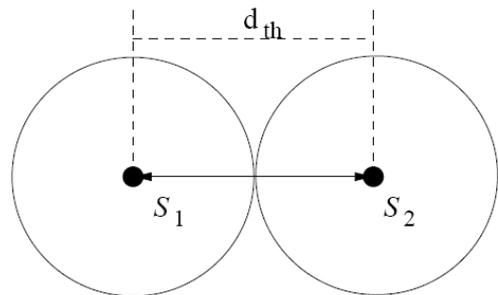


그림 6. VFA에서의 두 센서 간 기준 거리

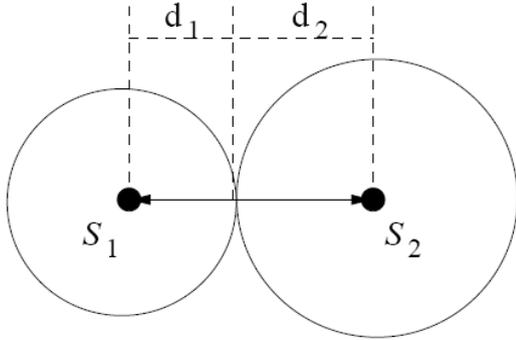


그림 7. EVFA에서의 두 센서 간 기준 거리

거리가 각 센서의 잔여 에너지와 싱크로부터 해당 센서까지의 거리를 고려해 결정된 배타 감지 영역 반지름의 합과 같도록 했기 때문이다. 예를 들면, 그림 7에서 센서 S<sub>1</sub>과 S<sub>2</sub> 사이의 거리는 두 센서의 배타 감지 영역 반지름 d<sub>1</sub>과 d<sub>2</sub>의 합과 같다.

지금부터는 센서 S<sub>k</sub>의 배타적 감지 영역 반지름 d<sub>k</sub>이 어떻게 결정되는지 살펴보자. 우선 이전 연구<sup>[4]</sup>에서 무선망의 노드 밀도가 ρ일 때 가장 가까운 이웃 노드와의 거리가 1/(2√ρ)임이 알려져 있으므로, 두 센서 사이에 감지 공백이 발생하지 않기 위해서는 d<sub>k</sub>가 1/(2√ρ)의 절반보다 커야 한다.

$$d_k \geq \frac{1}{2} \times \frac{1}{2\sqrt{\rho}} \tag{2}$$

단, 1/(4√ρ)이 센서의 전송 거리(transmission range) TR의 절반보다 큰 경우에는 d<sub>k</sub>를 TR/2과 같게 한다. 그 이유는 d<sub>k</sub>가 TR/2보다 크면 센서간의 거리가 센서의 패킷 전송 거리보다 커져 네트워크 분할 현상이 일어날 확률이 높기 때문이다.

다음은 센서 S<sub>k</sub>의 잔여 에너지와 싱크로부터의 거리 정보를 반영하기 위해 이들 값을 전체 모든 센서들과 비교하여 정규화 한다. EVFA는 무선 센서망 전체의 센서 밀도 정보를 제외하고는 이웃 센서들 간에 주고받는 정보만을 이용하는데, 이 정보에는 현재까지 각 센서가 수집한 최대/최소 잔여 에너지를 가진 센서 정보와 싱크로부터 최장/최단 거리에 있는 센서 정보가 포함된다. E<sub>k</sub>와 P<sub>k</sub>는 각각 센서 S<sub>k</sub>의 잔여 에너지의 양과 싱크로부터의 실제 거리<sup>2)</sup>를 나타내고, 이를 최대/최소값과 비교하여 정

규화 한 에너지와 근접도(proximity) 수준(level)을 e<sub>k</sub>와 p<sub>k</sub>로 표현한다. 이 e<sub>k</sub>와 p<sub>k</sub>는 전체 센서들의 잔여 에너지와 근접도를 크기 순으로 나열했을 때 센서 S<sub>k</sub>의 값이 최대값에 얼마나 가까운지를 보여주는 대략의 척도로 사용된다. 따라서, 센서 S<sub>k</sub>의 에너지와 근접도 수준은 아래와 같이 (최대값 - 최소값)과 (최대값 - 해당 센서의 값)의 비율로 간단히 계산될 수 있다. 아래에서 A<sub>k</sub>는 센서 S<sub>k</sub>와 이웃한 센서들의 집합이다.

$$e_k = \frac{E_k - E_{\min}}{E_{\max} - E_{\min}}, \text{ where} \tag{3}$$

$$E_{\min} = \min_{i \in \{A_k, k\}} E_i, \\ E_{\max} = \max_{i \in \{A_k, k\}} E_i.$$

$$p_k = \frac{P_k - P_{\min}}{P_{\max} - P_{\min}}, \text{ where} \tag{4}$$

$$P_{\min} = \min_{i \in \{A_k, k\}} P_i, \\ P_{\max} = \max_{i \in \{A_k, k\}} P_i.$$

본 논문에서는 S<sub>k</sub>의 잔여 에너지와 싱크 근접도를 고려한 전체 가중치를 아래 식과 같이 에너지와 근접도 수준의 평균으로 했다.

$$l_k = \frac{e_k + p_k}{2} \tag{5}$$

시스템에 따라 잔여 에너지와 근접도에 대한 중요도가 달라질 수 있으므로, 식 (5)를 가중치 α를 사용하여 아래와 같이 바꿀 수 있다.

$$l_k = \frac{\alpha e_k + (1 - \alpha) p_k}{2} \tag{6}$$

센서의 전송 거리(transmission range) TR이 가장 가까운 이웃 센서까지의 거리 1/(2√ρ)보다 작은 경우에는 네트워크 분할을 막기 위해 d<sub>k</sub>를 무조건 TR의 절반으로 설정한다. 반면, 그보다 크거나 같은 경우에는 네트워크 분할을 걱정할 필요가 없어서 d<sub>k</sub>를 다소 여유있게 정할 수 있다. 따라서, 감지 범위(sensing range) SR과 가장 가까운 이웃까지 거리의 절반인 1/(4√ρ)의 사이에서 d<sub>k</sub>가 결정되는데, l<sub>k</sub> 값에 비례하여 최대 SR, 최소 1/(4√ρ)이 된다.

2) 모든 센서는 GPS 등을 이용하여 자신의 위치를 알고 있다고 가정한다.

$$d_k = \begin{cases} \frac{1}{4\sqrt{\rho}} + l_k \max\left\{\left(SR - \frac{1}{4\sqrt{\rho}}\right), 0\right\} \\ \frac{1}{2} TR & \text{if } TR \geq \frac{1}{2\sqrt{\rho}}, \\ \frac{1}{2} TR & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (7)$$

식 (7)의 의미를 다시 한번 정리하면 다음과 같다. 두 센서 간의 거리를 결정할 때 가장 중요한 것은 TR이다. 센서의 전파가 닿을 수 있는 거리보다 더 멀리 두 센서가 떨어져서는 안되므로  $d_k$ 는 최소 TR/2는 되어야 한다. 반면, TR이 충분히 큰 경우에 SR이  $1/(4\sqrt{\rho})$ 보다 크다는 것은 가장 가까이 이웃한 두 센서 간의 감지 범위가 서로 겹치는 것을 의미하므로 두 센서가 조금 더 떨어져도 상관없다.

같은 방식으로 이웃 센서  $S_m$ 의 배타적 감지 영역  $d_m$ 이 계산되면, 두 센서 간의 기준 거리  $d_{th}$ 는

$$d_{th} = d_k + d_m \quad (8)$$

이 된다.

### 3.4 잔여 에너지와 근접도 정규화 수준의 불공정성에 대한 우려

식 (3)과 (4)를 통해 각 센서의 잔여 에너지와 근접도 수준(level)을 결정하였다. 이 수준은 전체 센서들의 정보가 아닌 이웃 노드들의 값들과만 비교를 하여 결정되므로, 같은 에너지를 가진 센서라도 주위 노드들의 상태에 따라 전혀 다른 잔여 에너지 수준값  $e_k$ 를 가질 수 있다. 예를 들어, 잔여 에너지 20을 가진 센서  $S_a$ 와  $S_b$ 가 있고, 이웃 센서들에 대해 조사한 결과  $E_{max}$ 가 각각 100과 40,  $E_{min}$ 이 양쪽 모두 10이라고 가정하자. 식 (3)에 따라  $e_a = (20-10)/(100-10) = 1/9$  이고  $e_b = (20-10)/(40-10) = 1/3$  로 큰 차이가 난다. 같은 잔여 에너지를 가진 센서가 서로 다른 수준값을 갖는 것에 대해 센서 간 불공정성이 우려될 수 있으나 실상 이는 문제될 것이 없다. 센서  $S_a$ 와  $S_b$ 가 서로 이웃하는 경우와 이웃하지 않는 경우로 나누어 살펴보자.

먼저, 두 센서가 이웃하지 않는 경우 서로 다른 수준값은 전혀 문제를 일으키지 않는다. 각 센서가 갖는 수준값은 자신의 이웃들과의 사이 공간을 서로 어느 정도씩 담당할 것인지 결정하는 것이므로, 서로 이웃하지 않는 센서들이 잔여 에너지에 비례하는 공정한 수준값을 가질 필요는 없다.

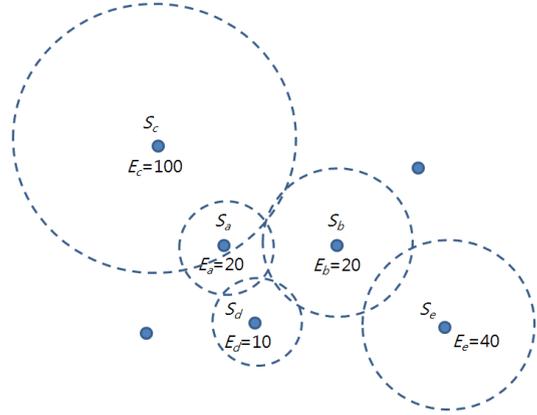


그림 8. 각 센서들의 잔여 에너지와 담당 감지 영역

한편, 두 센서가 서로 이웃할 경우에는 약간의 우려가 있을 수 있으나 두 수준값의 차이는 오히려 필수적이다. 그림 8은 앞서 가정된 센서  $S_a$ 와  $S_b$ 의 경우를 나타내었다.  $S_a$ 는  $S_b$ ,  $S_c$ ,  $S_d$ 와 이웃하고,  $S_b$ 는  $S_a$ ,  $S_d$ ,  $S_e$ 와 이웃한다. 비록 센서  $S_a$ 와  $S_b$ 가 같은 양의 잔여 에너지를 가지더라도 이웃 노드들과의 비교에서 둘은 서로 다른 수준값을 가지며, 이는 각각의 담당 영역을 결정하는 기준으로 사용된다. 센서  $S_a$ 의 이웃 센서들에 비해  $S_b$ 의 이웃들이 적은 양의 잔여 에너지를 가지므로,  $S_b$ 가 담당해야 할 감지 영역의 넓이가 상대적으로 넓어지는 것은 당연하다. 만일 센서  $S_a$ 와  $S_b$ 의 잔여 에너지 양이 같다고 해서 억지로 같은 수준값을 가지게 한다면  $S_a$ 가 불필요하게 넓은 지역을 담당해야 하거나  $S_b$ 와 그 이웃들 사이에 감지 공백 지역이 발생하게 될 것이다.

## IV. 실험 및 결과

실험을 통해 EVFA의 성능을 VFA와 비교하였다. 한 변의 길이가 50m인 정사각형 내에 30개의 이동 센서들이 있고, 모든 센서는 동일하게 전송 거리  $TR = 20m$ 와 감지 거리  $SR = 6m$ 를 갖는다. IEEE 802.11b를 MAC 프로토콜로 채택하였고, 최단 거리 라우팅을 사용했다. 실제적인 에너지 소모 모델은 [15]에 제시되어 있는데, 이것은 자유 공간 모델(free space model)과 다중경로 페이딩 채널 모델(multipath fading channel model) 둘 다에서 전자(electronics) 에너지와 증폭(amplifier) 에너지를 고려했다. 전자 에너지는 디지털 코딩(digital coding), 변조(modulation), 시그널 스프레딩(signal spreading)

등에 필요한 전력이고, 증폭 에너지는 패킷의 크기와 송신기-수신기 사이의 거리에 의해 결정된다. 본 논문에서는 자유 공간 모델을 사용했고, 모든 패킷의 크기는 512비트로 고정했다. 전송 거리 TR은 20m로 동일했으므로, [15]에 제시된 식에 따르면 패킷 하나를 송신하고 수신하는 데 필요한 에너지는 각각 0.221과 0.205 Joule이다. 한편, 센서가 1m 움직이기 위해 필요한 에너지는 27.96 Joule<sup>[8]</sup>로서 패킷 송수신 에너지보다 월등히 크므로, 가능하면 센서를 움직이지 않는 것이 좋다. 매초마다 임의로 선택된 센서에서 싱크로 패킷이 하나씩 전송되며, 각 센서의 초기 에너지는 900과 1000 Joule 사이에서 임의로 선택된다. 전체 실험 시간은 5000초이고, 모든 그래프는 30회의 실험에 대한 평균값이다.

먼저, 각 센서의 남은 에너지 및 싱크 노드까지의 거리가 이웃 노드와의 평균 거리에 미치는 영향을 확인해 보았다. 표 1에서 볼 수 있듯이 VFA에서는 상관관계를 거의 찾아볼 수 없었으나 EVFA에서는 남은 에너지의 양과 싱크 노드까지의 거리에 이웃 노드와의 평균 거리가 비례하는 모습을 보였다.

표 2는 WA와 WR을 바꿔 가며 매 라운드에서 VFA와 EVFA의 감지 가능 영역의 비율을 비교했다. 양쪽 방법 모두에서 초기 몇 라운드 동안은 감지 가능 영역의 비율이 계속적으로 증가하지만, 3~5 라운드 이후에는 거의 일정하게 유지된다. 세 번의 라운드가 수행된 후만 비교해 보면, WA가 0.002로

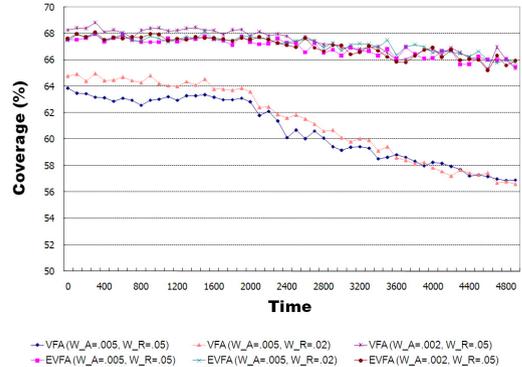


그림 9. 감지 가능 영역의 변화 추이

매우 작고 WR이 0.05로 큰 편일 경우 VFA가 0.67% 정도 나은 성능을 보이기도 하지만, 대부분의 경우에는 EVFA가 평균 3.18% 정도 더 우수하다.

그림 9는 시뮬레이션 시간에 따른 감지 가능 영역의 변화를 보인다. 실험 초반부에는 4~6% 정도 EVFA가 더 우수한 성능을 보이다가 후반부로 갈수록 차이가 벌어져 11% 정도 감지 가능 영역 비율 차이를 보인다. 이같은 현상이 나타나는 이유는 두 방법 중 VFA의 경우가 센서들을 물리적으로 더 많이 움직이게 해서 에너지 소모가 커지기 때문이다. 시간이 흐를수록 에너지의 완전 소모로 동작이 중지되는 센서가 생기므로 감지 가능 영역의 비율은

표 1. 남은 에너지 또는 싱크까지 거리와 이웃 노드 평균 거리와의 상관관계

센서	항목	VFA			EVFA		
		남은 에너지	싱크와의 거리	이웃노드 평균거리	남은 에너지	싱크와의 거리	이웃노드 평균거리
1		602.07	32.65	13.25	894.73	32.65	12.55
2		510.37	14.87	11.34	662.77	16.40	11.18
3		819.37	13.00	9.30	611.05	13.00	10.21
4		942.57	35.00	15.77	942.57	35.00	14.79
...		...	...	...	...	...	...
	이웃노드 평균거리와의 상관계수	-0.002	0.085	N/A	0.174	0.218	N/A

표 2. VFA와 EVFA를 사용했을 때 무선 센서망의 전체 감지 영역 비율 (%)

Round	WA =.005	WR =.05	WA =.005	WR =.02	WA =.002	WR =.05
	VFA	EVFA	VFA	EVFA	VFA	EVFA
0	52.97	52.97	52.97	52.97	52.97	52.97
1	58.89	60.03	58.89	59.91	60.56	60.14
2	61.24	65.67	62.21	65.23	65.37	65.18
3	63.86	67.53	64.78	67.46	67.27	66.60

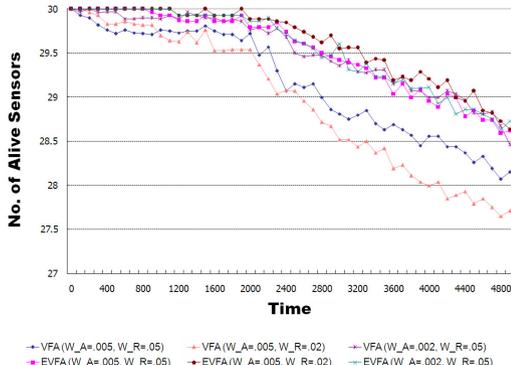


그림 10. 동작 중인 센서 수의 변화 추이

줄어들 수밖에 없는데, VFA의 경우에 동작 센서들의 수가 더 빨리 줄어든다. 이것은 시간이 흐름에 따라 현재 동작하고 있는 센서 수의 변화를 나타낸 그림 10에서 확인할 수 있다. 본문에서도 얘기했듯이 EVFA는 에너지가 얼마 남지 않았거나 이른 시간 내에 에너지를 모두 소모할 확률이 높은 센서들을 미리 예측하여 이들이 담당할 지역을 작게 함으로써 이후 다른 센서들의 이동 거리를 짧게 하는 효과가 있다. 센서들의 총 이동 거리를 비교하면,

- 1) WA =.005, WR =.05일 때, EVFA를 이용하는 네트워크 센서들의 이동 거리는 VFA를 이용하는 네트워크 센서들의 이동 거리의 38.01%이고,
- 2) WA =.005, WR =.02일 때는 36.72%에 불과하다. 한편,
- 3) WA =.002, WR =.05일 때는 107.98%로 EVFA 이용 센서들이 조금 더 많이 움직이지만, 센서의 전체 수명이나 패킷 전달율(packet delivery ratio) 면에서는 여전히 EVFA가 우수한 성능을 보였다. 패킷 전달율은 각 센서가 전송한 패킷이 싱크에 도달한 비율을 뜻하는데, 30회의 실험에서 VFA는 89.99%, EVFA는 93.52%를 나타내었다.

그림 11에서는 VFA와 EVFA 방법을 시간에 따른 센서 잔존 에너지 값으로 비교하였다. VFA는 최초 몇 라운드에서부터 긴 거리의 이동에 따른 에너지 소모량이 EVFA에 비해 10% 가량 큰 모습을 보였다. 이는 계속해서 몇몇 센서 노드 에너지의 빠른 소모로 이어졌고, 센서의 밀도가 낮아져 앞에서 보았다시피 패킷 전달율의 저하 현상을 나타냈다.

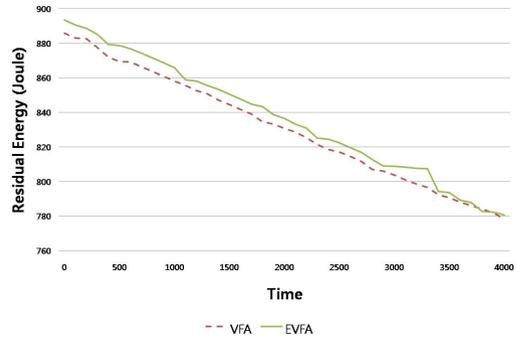


그림 11. 센서 전력 에너지 변화 추이

시간이 더 흐르면서 시뮬레이션 말기에는 VFA와 EVFA에서의 잔존 에너지 양이 거의 비슷해지는데 이는 EVFA에서 패킷 전달율이 더 높은 데 기인한다. VFA를 사용할 때는 전달될 수 없었던 패킷들이 EVFA에서는 목적지까지 전달되면서 더 많은 에너지를 소모하기 때문이다.

## V. 결 론

본 논문에서는 무선 센서망(WSN)의 수명 연장을 위해 센서의 불필요한 움직임을 줄이는 이동 센서 재배치 방법을 제안했다. 제안된 EVFA 방법은 센서의 잔여 에너지가 적거나 싱크에 가까울수록 작은 범위의 센싱을 담당하게 함으로써, 해당 센서가 에너지 부족으로 네트워크에서 이탈했을 때 발생하는 감지 공백 지역을 메우기 위해 다른 센서가 이동해야 할 거리를 미리 줄여놓는 효과가 있다. EVFA를 이용하는 센서들은 VFA를 이용하는 센서들이 이동하는 거리의 평균 40% 정도만 움직이면 되었고, 이는 곧 무선 센서망의 수명 연장으로 이어졌다. 향후 연구에서는 EVFA가 VFA에 대해 갖는 장점을 VEC, VOR, Minimax, Grid-Quorum, SMART 등의 기존 연구들에도 적용해보려 한다.

## 참 고 문 헌

- [1] X. Ji and H. Zha, "Sensor Positioning in Wireless Ad-hoc Sensor Networks Using Multidimensional Scaling," in *Proc. IEEE INFOCOM '04*, pp. 2652-2661, 2004.
- [2] F. Y. S. Lin and P. L. Chiu, "A Near- Optimal Sensor Placement Algorithm to Achieve Complete Coverage/Discrimination in Sensor Networks,"

- IEEE Communications Letters*, Vol. 9, No. 1, pp. 43-45, Jan. 2005.
- [3] J. Wu and S. Yang, "SMART: A Scan-Based Movement-Assisted Sensor Deployment Method in Wireless Sensor Networks," in *Proc. IEEE INFOCOM '05*, pp. 2313-2324, 2005.
- [4] Y. Zou and K. Chakrabarty, "Sensor Deployment and Target Localization Based on Virtual Forces," in *Proc. IEEE INFOCOM '03*, pp. 1293-1303, 2003.
- [5] G. Wang, G. Cao, and T. L. Porta, "Movement-Assisted Sensor Deployment," in *Proc. IEEE INFOCOM '04*, pp. 2469-2479, 2004.
- [6] G. Wang, G. Cao, and T. L. Porta, "Proxy-Based Sensor Deployment for Mobile Sensor Networks," in *Proc. IEEE MASS '04*, pages 493-502, 2004.
- [7] T. Wong, T. Tsuchiya, and T. Kikuno, "A Self-organizing Technique for Sensor Placement in Wireless Micro-Sensor Networks," in *Proc. AINA '04*, pp. 78-83, 2004.
- [8] G. Wang, G. Cao, T. L. Porta, and W. Zhang, "Sensor Relocation in Mobile Sensor Networks," in *Proc. IEEE INFOCOM '05*, pp. 2302-2312, 2005.
- [9] X. Du and F. Lin, "Improving Sensor Network Performance by Deploying Mobile Sensors," in *Proc. IPCCC '05*, pp. 67-71, 2005.
- [10] "<http://www.comp.lancs.ac.uk/~kristof/research/notes/voronoi/>"
- [11] "<http://www.cs.cornell.edu/Info/People/chew/Delaunay.html>"
- [12] 김대영, 최혁재, 이종언, 차시호, 강석중, 조국현, 조민호, "센서의 성능에 영향을 미치는 환경 요소들에 기반한 센서 노드 배치 방법", *한국통신학회 논문지 (네트워크 및 서비스)*, 33(10), 894-903, 2008년 10월.
- [13] T. Banerjee, K. Chowdhury, and D. P. Agrawal, "Tree-Based Data Aggregation in Sensor Networks Using Polynomial Regression," in *Proc. Fusion*, Sep. 2005.
- [14] C. Bettstetter, "On the Minimum Node Degree and Connectivity of a Wireless Multihop Network," in *Proc. ACM MobiHoc '02*, pp. 80-91, 2002.
- [15] W. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 1, No. 4, pp.660-670, Oct. 2002.

유영환 (Younghwan Yoo)

정회원



1996년 2월 서울대학교 컴퓨터 공학과 졸업

1998년 2월 서울대학교 컴퓨터 공학과 석사

2004년 2월 서울대학교 컴퓨터 공학과 박사

2004년 5월~2006년 12월 미국

신시내티 대학교 전기컴퓨터공학부 연구원

2007년 3월~현재 부산대학교 정보컴퓨터공학부 조교수

<관심분야> 센서네트워크, RFID/USN, 애드혹통신