

무선 센서 네트워크의 자기 조직화된 클러스터의 에너지 최적화 구성에 관한 연구

이규홍 · 이희상[†]

성균관대학교 시스템경영공학과

A Study on Energy Efficient Self-Organized Clustering for Wireless Sensor Networks

Kyuhong Lee · Heesang Lee

Dept. of Systems Management Engineering, Sungkyunkwan University

Efficient energy consumption is a critical factor for deployment and operation of wireless sensor networks (WSNs). To achieve energy efficiency there have been several hierarchical routing protocols that organize sensors into clusters where one sensor is a cluster-head to forward messages received from its cluster-member sensors to the base station of the WSN. In this paper, we propose a self-organized clustering method for cluster-head selection and cluster based routing for a WSN. To select cluster-heads and organize cluster-members for each cluster, every sensor uses only local information and simple decision mechanisms which are aimed at configuring a self-organized system. By these self-organized interactions among sensors and self-organized selection of cluster-heads, the suggested method can form clusters for a WSN and decide routing paths energy efficiently. We compare our clustering method with a clustering method that is a well known routing protocol for the WSNs. In our computational experiments, we show that the energy consumptions and the lifetimes of our method are better than those of the compared method. The experiments also shows that the suggested method demonstrate properly some self-organized properties such as robustness and adaptability against uncertainty for WSN's.

Keywords: Wireless Sensor Network(WSN), Self-organization, Clustering, Energy Efficiency.

1. 서론

초소형 센서와 정밀기기의 발달로 인해 센서 장치의 활용 폭이 넓어지고 있고, 무선통신 기술의 발달에 따라 무선 센서 네트워크(wireless sensor network)가 큰 주목을 받고 있다. 무선 센서 네트워크는 무선의 특성에 따라 역동적이고 불확실한 환경이나 군사작전 등은 물론 생산, 물류, 유통, 교통, 의료 등 산업계 전반에서 널리 사용되고 있다(Yick *et al.*, 2008).

무선 센서 네트워크를 구성하는 센서는 하나의 네트워크를 구성하기 위해 적게는 수십 개에서 많게는 수천 개의 센서가

필요하기 때문에 경제성을 고려하여 프로세서, 메모리, 전원 장치 등의 기본 구성 요소들의 성능이 제한적인 값이 저렴한 센서들을 사용한다. 따라서 무선 센서를 사용한 네트워킹에는 센서의 처리 능력을 감안하여 중앙집중식 라우팅 방법보다는 분산처리 라우팅 방법이 더 널리 쓰인다(Yick *et al.*, 2008). 이때 무선 센서의 전원 장치는 충전이나 교체가 거의 불가능하므로 에너지 소비를 최소화하여 센서의 수명을 최대화하여야 하기 때문에 에너지 소비의 효율성이 매우 중요하다(Mahfoudh and Minet, 2008).

무선 센서 네트워크의 통신채널은 '평면 라우팅'(flat routing)

이 논문은 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지자원인력양성사업의 연구결과임.

[†] 연락저자 : 이희상 교수, 440-746 경기도 수원시 장안구 천천동 300 성균관대학교 시스템경영공학과, Tel : 031-290-7604, Fax : 031-290-7610,

E-mail : leehee@skku.edu

2011년 3월 15일 접수; 2011년 7월 11일 게재 확정.

이라고 부르는 다중 도약 그물형망(multi-hop mesh network)을 통해 구성될 수 있다. 이와 같은 경우의 라우팅은 센서에서 데이터 패킷을 최종 목적지인 베이스 스테이션(base station)까지 전송할 때까지의 전송 경로를 결정한다. 반면에 무선 센서 네트워크는 여러 개의 클러스터로 분할할 수도 있다. 이 경우에 각 클러스터는 클러스터 헤드와 클러스터 멤버들로 구성된다. 클러스터를 구성한 후 라우팅을 수행하는 ‘계층적 라우팅’(hierarchical routing)은 클러스터 멤버들이 자신의 클러스터 헤드로 데이터 패킷을 전송하고 클러스터 헤드는 이 데이터 패킷들을 통합하여 베이스 스테이션으로 전송한다(AI-Karaki and Kamal, 2004; Chang, 2007). 무선 센서 네트워크를 위한 계층적 라우팅의 대표적 알고리즘인 LEACH(Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy)는 다른 센서 노드보다 에너지 소모가 큰 클러스터 헤드의 역할을 각 센서가 번갈아가며 나누어 맡게 함으로써 모든 센서 노드들이 에너지를 효율적으로 사용하도록 한 방법이다(Heinzelman *et al.*, 1999). Oh *et al.*(2010)은 LEACH를 개선하여 클러스터 헤드를 결정하는 확률식에 거리에 대한 가중치를 곱하는 간단한 방법을 사용하여 시간이 경과한 후에도 센서 네트워크가 커버하는 영역의 축소를 억제하여 고른 정보 수집이 가능토록 하였다.

최근 공학 분야에서 자기 조직화(self-organization)에 관한 연구들이 활발히 진행 중이다. 자기 조직화된(self-organized) 시스템은 제조, 생산, 관리와 통신 분야 등의 적용에서 많은 이점을 주고 있다(Dressler, 2007). 통신 분야에서 자기 조직화된 네트워크는 기존의 네트워크가 전역 상태(global state) 정보를 토대로 결정론적인 최적화 기법을 사용하여 의사결정하는 것과는 달리 지역 상태(local state)의 위치 정보와 이웃 정보를 사용하여 간단한 규칙들을 사용하여 의사결정을 수행한다. 결정론적 최적화 기법은 최적해를 구할 수는 있지만, 계산 복잡도가 크기 때문에 높은 계산 능력과 많은 시간을 요구하므로, WSN에서 사용하는 성능이 제한적이고 값이 저렴한 무선 센서들로는 실행 불가능한 경우가 대부분이다. 하지만 자기 조직화된 시스템을 구현하면 각각의 센서가 자신의 제한된 성능 하에서 주변정보만으로 의사결정을 하기 때문에 자신의 처리 장치(process unit)와 기억장치(memory)의 성능과 용량으로도 주어진 과업을 적절하게 수행할 수 있다(Dressler, 2008). 따라서 WSN 분야에서는 자기 조직화된 시스템이나 방법론의 특징과 장점을 활용한 연구가 활발히 진행되고 있다(Marinescu *et al.*, 2008), (Sakhaee *et al.*, 2008).

본 논문에서는 무선 센서의 제약들을 고려하여 효율적인 에너지 소비를 달성하기 위해, 자기 조직화된 계층적 라우팅 방법을 제안한다. 제안하는 방법은 각 센서들이 주변으로부터 받는 메시지를 이용하여 클러스터 헤드들을 결정한다. 메시지를 통해 이웃 센서의 정보를 수집하고 이를 토대로 자신의 적합성 값(fitness value)을 계산한다. 이웃 센서들과 이 값을 비교하여 다른 중앙처리장치의 도움 없이 클러스터를 형성하고 클러스터를 이용하여 라우팅을 결정한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 2장에서는 자기 조직화의 정의와 통신 분야의 관련된 연구들에 대하여 알아본다. 제 3장에서는 제안하는 모델에 대해서 가정, 방법, 세부 단계, 파라미터 설정 등을 설명한다. 제 4장에서는 제안하는 모델과 잘 알려진 자기 조직화된 클러스터 헤드 선택 방법인 HEED와 기본적인 성능을 비교하고, 제안하는 모델의 강건성과 불확실성에 관한 실험을 수행한다. 마지막 장에서는 본 논문의 결론과 앞으로의 연구과제에 대해서 언급한다.

2. 자기 조직화

2.1 자기 조직화의 정의

자기 조직화는 과학의 여러 분야에서 사용되고 있지만 연구자들의 연구 분야에 따라 관점과 범위가 다르기 때문에 아직까지 널리 통용되는 정의는 없다. 따라서 본 연구에서는 범용적이지만 여러 연구 분야를 포괄할 수 있는 다음과 같은 정의를 사용한다.

여러 개체들로 구성된 시스템이 특정 구조와 특정 기능을 가지면 우리는 이 시스템이 ‘조직화’ 되었다고 정의한다(Prehofer *et al.*, 2005). 조직화된 개체들은 구조화 측면에서는 특정 방법으로 배열되고 다른 개체들과 상호작용을 하며, 기능적 측면에서는 전체 시스템이 특정 목표에 부합되어야 한다. 시스템이 외부의 간섭이나 중앙집중적 제어 없이 개체들 개개가 분산화된 피어 투 피어(peer to peer) 방식으로 직접적인 상호작용만을 통해 조직화 되는 것을 ‘자기 조직화’라고 정의한다(Dressler, 2007). 하지만 자기 조직화가 단순히 분산 시스템을 의미하는 것은 아니다. 자기 조직화는 거시적 수준(전체 시스템)과 미시적 수준(개별 요소)간의 기능과 구조적 측면의 결과 사이에서 유기적인 관계가 성립되어야 한다. 즉, 시스템을 구성하는 개별 요소들의 지역적이고 개별적인 행동이 전체 시스템 관점에서는 하나의 조화로운 목적을 이뤄야 한다.

자기 조직화된 시스템을 사용하는 장점은 크게 세 가지로 구분할 수 있다. 첫 번째, 자기 조직화 시스템은 개별 요소들의 고장, 손상, 실패에 유연하게 대처하여 시스템 전체의 문제를 야기시키지 않도록 하는 강건성(robustness)을 가진다. 두 번째, 자기 조직화된 시스템은 시스템이나 외부환경의 불확실성(uncertainty)에 대해 개별 요소들이 상호작용하며 계속적으로 불확실성에서 기인하는 변화에 적응할 수 있다. 세 번째, 자기 조직화 시스템은 시스템을 구성하는 개별 요소들의 수의 증가에 따른 시스템의 성능 저하가 없는 확장성(scalability)을 가진다.

2.2 자기 조직화와 통신 네트워크

통신 네트워크가 발달하면서 확장성의 향상과 설치의 간편화에 대한 요구로 인해 중앙집중 시스템 방식에서 분산처리 시스템 방식으로 패러다임이 변화하였다. 전역 상태 정보를

최소화하기 위해 지역 상태 정보와 간단한 규칙들만을 사용하여 시스템을 구성하는 자기 조직화된 시스템은 분산처리 시스템보다 통신 트래픽의 오버헤드를 줄일 수 있고 위에서 언급한 적응성, 강건성, 확장성의 장점을 가지므로 현재 많은 연구가 진행 중이다.

자기 조직화는 애드혹(ad-hoc) 네트워크, 무선 센서 네트워크, 무선 랜 등의 무선 네트워크 분야에서 라우팅, 클러스터 구성, MAC 프로토콜 설계 등에 적용되고 있다. 셀룰러 네트워크 분야에서는 무선 자원 관리(radio resource management)에 적용되어 게임 이론, 최적화 기법들과 접목되어 연구되고 있다. 무선 센서 네트워크에 관련된 대표적인 자기 조직화 관련 연구는 다음과 같다.

Rogers *et al.*(2005)는 무선 센서 네트워크에서 각각의 센서들이 국지적인 범위에서 이기적 전략을 사용하는 ‘에너지 인식 자기 조직화 라우팅’ 방법을 제안하였다. 각각의 센서는 자신의 송신범위를 줄여 송신 에너지 소모를 최소화하기 위해 베이스 스테이션으로의 직접 전송보다는 중계 센서를 설정하고 중계 센서에 데이터 패킷을 전송하도록 노력한다. 하지만 이 때, 중계 센서는 다른 센서를 위해서 자신의 에너지 소모량이 높아지기 때문에 이를 보상하기 위해 페이먼트 제도(payment scheme)를 사용한다. 페이먼트 값을 적절히 조절하기 위해 각각의 센서들은 자기 조직화 방법론을 사용하고 전체 네트워크의 성능은 향상된다. 중앙집중적 시스템을 사용한 시뮬레이션드 에널링으로 얻은 해와 비교하면 10% 미만의 성능차를 보이기 때문에 분산 시스템을 고려할 때 최대 값에 매우 가깝다. 이 클러스터링 방법은 자기 조직화의 사용으로 성능이 좋고 외부환경 변화에 강건하고 센서 배치의 변화에 둔감한 특징을 보인다.

Chang *et al.*(2006)은 무선 센서 네트워크에서 클러스터 기반의 자기 조직화된 라우팅을 제안하였다. 이 방법은 클러스터 간의 통신비용을 줄이기 위하여 클러스터 간 라우팅과 클러스터 내 라우팅 두 가지로 구성된다. 클러스터 헤드의 수는 “전체 상품의 20%가 80%의 매출을 올린다.”는 파레토 법칙을 적용하여 결정한다. 클러스터 내 라우팅은 DSDV(Destination Sequenced Distance Vector)의 변형된 방법을 사용한다. 클러스터 간 라우팅은 오버헤드를 줄이기 위해 온 디맨드(on demand) 방식을 사용한다. 쿼리(query)를 이용하여 온 디맨드 방식으로 인접 클러스터에게 클러스터 내 라우팅 정보를 요청하고 이 정보를 받아 클러스터 간 라우팅 경로를 설정한다. 이 방법은 네트워크의 크기가 증가할 때 성능저하와 컨트롤 패킷 오버헤드의 증가가 비교 방법들 보다 현저히 적게 나타난다.

Younis and Fahmy(2004)는 HEED(Hybrid Energy-Efficient Distributed)라는 자기 조직화된 클러스터링 방법을 제안하였다. HEED에서는 WSN의 클러스터 헤드의 선택을 위해 센서들의 잔존 에너지와 통신비용을 혼합하여 클러스터 헤드를 선정한다. 통신비용은 평균 최소 도달 파워(AMRP : Average Minimum Reachability Power) 또는 이웃들의 밀집도를 이용하

여 계산한다. 클러스터 헤드가 결정되면 ‘너비 우선 탐색 나무’(BFST : Breadth First Search Tree)를 사용하여 클러스터 헤드들끼리의 라우팅 경로를 설정하여 베이스 스테이션까지 데이터를 전송하는 3계층 구조의 계층적 라우팅 프로토콜을 사용한다. HEED는 이전의 분산형 방법들과 비교하여 네트워크의 성능을 유지시키거나 향상시키는 강점을 보여준다. 우리는 제 4장에서 우리가 제안하는 방법과의 성능 비교를 위해 HEED를 사용할 것이다.

3. 자기 조직화된 클러스터링 방법

3.1 기본 가정들과 전파 모델

본 연구에서 제안하는 클러스터링 방법에서 사용한 기본 가정들과 에너지 소비 모델은 다음과 같다.

3.1.1 기본 가정들

본 논문에서는 모든 센서들과 베이스 스테이션의 위치는 고정되어 있고, 베이스 스테이션의 위치는 미리 알고 있다고 가정한다. 모든 데이터 패킷은 동일한 크기인 k bits이고 각 센서들은 초기 에너지 E_i 를 가진다. 정해진 한 ‘기간’(period)에 한 번씩 클러스터 멤버들은 감지(sensing)한 정보를 토대로 하나의 데이터 패킷을 생성하고 이 데이터 패킷을 클러스터 헤드로 전송한다. 클러스터 헤드는 자신의 클러스터 멤버들로부터 받은 데이터 패킷들을 병합(agggregation)하여 베이스 스테이션으로 보낸다. 센서 네트워크의 ‘수명’(lifetime)은 특정 수의 센서가 에너지를 모두 소모하여 작동할 수 없을 때까지의 기간으로 정의한다.

클러스터링을 너무 자주 수행한다면 클러스터링을 위한 메시지 교환의 증가로 클러스터링에 참여하는 다수의 센서들의 에너지 소모가 많아진다. 반면에 한번 수행한 클러스터링을 고집하여 클러스터 헤드의 변화가 없다면 클러스터 헤드로 사용되는 센서의 에너지는 다른 센서에 비교하여 과도하게 사용된다. 따라서 효율적인 에너지 소비를 위해 ‘클러스터링 주기’(clustering round)라는 개념을 사용할 수 있다. 즉, 한 번의 클러스터링 후 일정 기간 동안에는 구성된 클러스터들을 사용하여 라우팅을 수행한 후 새로운 클러스터들을 구성한다면 클러스터링 작업에 필요한 에너지 소비와 클러스터 헤드로써의 에너지 소비의 균형을 찾을 수 있다. 클러스터링을 새로 수행할 때까지의 일정 기간의 수를 클러스터링 주기라고 정의한다.

3.1.2 1차 무선 전파 모델

무선 데이터 전송에 있어서 에너지 소모는 데이터 패킷의 크기와 두 센서간의 거리와 관련이 있다. 본 연구에서는 WSN에서 널리 쓰이는 다음과 같은 1차 무선 전파 모델(first order radio model) (Heinzelman *et al.*, 2000)을 에너지 소비 모델로 사용한다.

- 데이터 패킷 전송시
송신기 회로에서 $\epsilon_{elec} = 50nJ/bit$ 소비
증폭기에서 $\epsilon_{amp} = 100pJ/bit/m^2$ 소비
- 데이터 패킷 수신시
수신기 회로에서 $\epsilon_{elec} = 50nJ/bit$ 소비
- 두 센서 i 와 j 사이의 거리가 d_{ij} 일 때 센서 i 에서 j 로 k 비트의 데이터 패킷을 전송할 경우, 센서 i 의 에너지 소모는 다음과 같다.

$$T_{ij} = \epsilon_{elec} \times k + \epsilon_{amp} \times d_{ij}^2 \times k \quad (1)$$

- 센서 i 가 k 비트의 데이터 패킷을 수신할 경우, 센서 i 의 에너지 소모는 다음과 같다.

$$R_i = \epsilon_{elec} \times k \quad (2)$$

이 무선 전파 모델에서 메시지의 전송은 대칭전송채널을 가진다. 즉, 센서 i 에서 센서 j 로 데이터 패킷을 전송할 때 소모되는 에너지는 센서 j 에서 센서 i 로 데이터 패킷을 전송할 때 소모되는 에너지와 동일하다.

3.2 클러스터링 방법

이 장에서 우리는 ‘자기 조직화된 클러스터링(SOC : Self-Organized Clustering)’를 제안한다. 이 클러스터링 방법은(Lee et al., 2008; Lee and Lee, 2008) 논문에서 발표한 SOHS와 SOSA-CC 방법을 자기 조직화 관점에서 단순화시키면서도 성능을 개선한 것이다.

SOC는 지역적인 정보와 이를 활용한 간단한 규칙들을 이용하여 작동된다. 즉, 각 센서는 무선 주파수를 브로드캐스팅하고 다른 센서가 보낸 주파수를 수신하여 이웃 센서의 위치와 주변의 상황을 인식하고, 이들 정보와 간단한 결정 메커니즘을 이용하여 클러스터링을 수행한다. SOC의 클러스터링 방법의 세부 내용은 다음과 같다.

SOC의 각 클러스터링 주기는 클러스터 헤드를 결정하고 클러스터를 형성하는 ‘클러스터링 단계’와 데이터의 송/수신이 발생하는 ‘전송 단계’로 구성되어 있다. SOC의 모든 센서들은 다음과 같은 4가지의 상태를 가진다 : ‘미정 상태’(undecided state), ‘헤드 후보 상태’(head candidate state), ‘헤드 상태’(head state), ‘멤버 상태’(member state). 만일 어떤 센서가 미정 상태에 놓여있을 경우 해당 센서는 클러스터 헤드나 클러스터 멤버 중 어떤 역할도 수행하지 않는다. 센서가 어떠한 임계값 이상의 신호를 수신하면 그 센서는 헤드 후보 상태로 바뀐다. 따라서 헤드 후보 상태에 놓여있는 센서들만이 헤드 선택 과정에 참여할 수 있다. 헤드 선택 단계에서(다음 절에 설명하는 방법에 따라) 클러스터 헤드로 선택된 센서는 헤드 상태로 바뀌고, 다른 센서들은(다음 절에 설명하는 방법에 따라) 하나의

클러스터 헤드를 선택하면 멤버 상태로 바뀌고 클러스터 멤버의 작업을 수행한다.

3.2.1 클러스터링 단계

SOC는 라우팅 방법에 따른 데이터 전송 이전에 계층적 라우팅을 위한 클러스터링 단계가 먼저 필요하다. 클러스터링 단계는 센서가 처음 센서 필드에 배치된 경우와 한 클러스터링 주기의 데이터 전송 단계가 끝난 뒤에 시작되어야 한다. 클러스터링 단계는 브로드캐스트, 헤드 선택, 클러스터 결정의 3개의 세부 단계로 나누어진다.

- 브로드캐스트 세부 단계 : 직전 클러스터링 주기의 클러스터 헤드들은 자신과 가장 멀리 떨어진 클러스터 멤버까지의 거리인 ‘헤드 커버리지’(head coverage)의 $x\%$ 내에 위치한 센서들에게 도달할 수 있는 전파 세기로 ‘변경 신호(change signal)’를 브로드캐스트 한다(단, 처음 센서가 센서필드에 배치되었을 때는 직전 클러스터링 주기의 클러스터 헤드가 존재하지 않기 때문에 이와 같은 브로드캐스트 단계를 생략하고 모든 센서가 클러스터 헤드 후보가 된다). 이와 같이 가까운 센서까지로만 브로드캐스팅 하는 이유는 현재의 클러스터 헤드의 위치가 클러스터의 중심적인 위치이므로 자신과 가까운 곳에 위치한 센서들에게 새로운 클러스터 헤드 기회를 주기 위해서이다. 변경 신호를 브로드캐스트한 클러스터 헤드들은 미정 상태로 바뀌게 되고, 변경 신호를 수신한 클러스터 멤버들은 헤드 후보 상태에 놓이게 된다. 클러스터 헤드로부터 멀리 떨어져 있어 변경 신호를 수신하지 못한 클러스터 멤버들은 멤버 상태에서 미정 상태로 바뀐다. 이 때 변경 신호를 브로드캐스트한 클러스터 헤드는 이후에는 미리 정한 클러스터링 주기 동안에는 헤드선택 세부 단계에 참여하지 못하도록 자신의 타부 리스트에 기록한다. 타부 리스트를 활용하면 하나의 센서가 클러스터 헤드 역할을 너무 자주 수행하여 에너지가 빠르게 소비되는 것을 방지한다.
- 헤드선택 세부 단계 : 각 헤드후보 상태의 센서들은 반경 p 미터 안에 수신될 세기로 ‘후보 신호(candidate-signal)’를 브로드캐스트 한다(단, 처음 센서가 배치된 상태에서는 모든 센서를 헤드후보 상태로 간주한다). 각 클러스터 헤드 후보들은 다른 클러스터 헤드 후보들로부터 받은 후보 신호의 개수를 합산하고, 이 값을 기존의 클러스터 헤드 커버리지 전체에 브로드캐스트 한다. 각 클러스터 헤드 후보들은 여러 정보를 이용해서 자신의 적합성 값을 계산하고 이를 다시 자신이 속한 클러스터의 헤드 커버리지 안에 브로드캐스트 한다(적합성 값을 계산하는 방법에 대해서는 ‘3.3 적합성 값’에서 자세히 다루도록 한다). 각 클러스터 헤드 후보들은 수신한 적합성 값들을 자신의 것과 비교한 후 자신의 적합성 값이 수신한 값보다 작을 경우 헤드 후보 상태에서 미정 상태로 바뀐다.

- 클러스터 결정 세부 단계: 미정 상태의 센서를 멤버 상태로 바꾸기 위해서 클러스터 헤드들은 센서 필드 전역에 '헤드 신호(head-signal)'를 브로드캐스트 한다. 모든 미정 상태의 센서들은 헤드 신호를 통해 가장 가까운 곳에 있는 클러스터 헤드를 찾고 해당 클러스터에 속하게 되며 멤버 상태로 변한다.

3.2.2 데이터 전송 단계

클러스터 헤드 선택 단계가 끝난 뒤에 클러스터 멤버들은 각 기간마다 주변 데이터를 감지하고 데이터 패킷을 클러스터 헤드로 전송한다. 각 클러스터 헤드는 수신된 데이터 패킷들을 모아 다시 베이스 스테이션으로 전송하며 이러한 센서의 감지와 데이터 전송 과정을 하나의 클러스터링 주기 동안 반복한다.

3.3 적합성 값

클러스터링의 성능을 결정하는데 가장 중요한 것은 어떤 기준으로 클러스터 헤드를 선택하느냐는 것이다. SOC는 다음과 같은 적합성 값을 사용한다.

먼저, 각 헤드 후보 상태의 센서들이 수신한 후보 신호의 개수를 주목한다. 각 헤드 후보 상태인 센서의 후보 신호 수신 개수는 자신의 주위에 얼마나 많은 이웃 센서가 위치하는지를 나타낸다. 많은 이웃 센서가 위치한다면 중심적인 위치이므로 클러스터 헤드의 역할을 하기에 유리한 위치라고 판단한다. 하나의 클러스터 내에서 어떤 클러스터 헤드 후보가 가장 많은 후보 신호를 받았는지는 같은 클러스터 내에서 후보 신호 개수 중의 최대 값과 비교하여 결정한다. 따라서 우리는 다음의 비율을 적합성 값의 첫 번째 구성요소로 사용하였다.

$$\text{neighborhood degree} = 1 + \frac{\text{number of received candidate-signals}}{\text{max number of received candidate-signals}} \times 9 \quad (3)$$

클러스터 헤드가 클러스터 멤버에 비해 더 많은 에너지를 소모하기 때문에 균형 잡힌 에너지 소모를 위해서 클러스터 헤드를 공평하게 선택하는 것이 중요하다. 따라서 상대적으로 에너지가 많이 남은 센서들이 다음번 클러스터 헤드 후보로 고려되어야 한다. 에너지 상태는 같은 클러스터 내에서 가장 에너지가 많은 센서와 자신의 에너지와 비교하여 결정한다. 따라서 우리는 다음의 비율을 적합성 값의 두 번째 구성요소로 사용하였다.

$$\text{energy state} = 1 + \frac{\text{current remaining energy}}{\text{max remaining energy}} \times 9 \quad (4)$$

마지막으로 위의 두 값을 합성하여 다음과 같은 적합성 값을 구하는 최종식을 얻었다. 이때 두 값을 가중평균하는 방법

도 있지만, 그 효과를 좀 더 차이가 나게 하는 누승 방법을 사용하였다. 식 (3)과 식 (4)에서 비율에 9를 곱하고 1을 더해 항상 1에서 10사이의 값을 얻으므로 두개의 구성요소 간에 정규화를 수행하였고, 1보다 큰 수에 누승을 하도록 하여 지수(α 또는 $1-\alpha$)가 클수록 큰 값을 얻도록 하였다.

$$\text{fitness value} = \text{neighborhood degree}^{(1-\alpha)} + \text{energy state}^{\alpha} \quad (5)$$

위 식에서 0과 1사이의 값인 α 의 비중을 낮추면 주변 이웃의 수(즉, 밀집도)의 중요도를 더 반영할 수 있고, 반대로 α 의 비중을 높이면 헤드 선출에 있어서 에너지 상태 중요도를 더 반영할 수 있다.

3.4 파라미터

본 절에서는 SOC에 쓰인 파라미터들의 의미와 특성에 대해 설명한다. 또한 어떻게 이들을 결정하는지도 설명한다.

3.4.1 후보 신호의 브로드캐스트 범위

클러스터링 단계의 헤드선택 세부 단계에서 클러스터 헤드 후보들은 일정한 p 미터의 범위 안에 후보 신호를 브로드캐스트 한다. p 값이 커지면 클러스터의 범위가 커지기 때문에 전체 클러스터의 개수가 작아지고, 반대로 p 값이 작아지면 클러스터의 범위가 작아지기 때문에 전체 클러스터의 개수는 늘어난다. 클러스터의 크기와 개수는 전파 송수신시 에너지 소비의 효율을 크게 좌우하기 때문에 적절한 p 값을 설정해야 한다.

3.4.2 변경 신호의 브로드캐스트 범위

다음 클러스터 헤드를 결정하기 위해서 모든 클러스터 헤드는 헤드 커버리지의 $x\%$ 의 범위 안에 변경 신호를 브로드캐스트 한다. 헤드 커버리지의 파라미터 x 는 브로드캐스트 세부단계에서 헤드 후보가 될 센서들의 범위를 결정한다. x 값이 증가하면 클러스터 헤드 후보의 수가 증가하게 되고 클러스터링 과정에서의 센서 에너지 소모도 증가하고 된다. 반대로 x 값이 감소하면 클러스터 헤드 후보의 수가 감소하게 되고 클러스터링 과정에서의 센서 에너지 소모는 감소하지만 클러스터 헤드 후보가 적기 때문에 좋은 헤드를 선정할 가능성이 줄어들게 되므로 적절한 x 값을 설정해야 한다.

3.4.3 적합성 값의 파라미터

클러스터링 단계의 헤드 선택 세부 단계에서 모든 클러스터 헤드 후보들은 클러스터 헤드를 결정하기 위해 적합성 값의 비교를 수행한다. 이 때 α 값에 따라 적합성 값이 자신의 잔여 에너지와 이웃센서의 수 중 무엇을 더 중요하게 간주하는지가 달라지고, 이는 센서네트워크의 수명에도 영향을 미치기 때문에 적절한 α 값을 설정해야 한다.

3.4.4 타부리스트 수의 파라미터

SOC는 타부리스트를 이용하여 클러스터 헤드가 특정 센서가 반복적으로 선정되지 않고 좋은 위치에 있는 여러 센서가 클러스터 헤드 역할을 나누어 수행하도록 조절하고 있다. SOC에서는 타부리스트의 크기를 TL이라는 파라미터로 설정하였다. TL의 값은 WSN의 수명에 영향을 미치기 때문에 적절한 TL 값을 설정해야 한다.

3.4.5 파라미터 설정

본 절에서는 SOC의 성능을 극대화 시킬 수 있도록 위에서 언급한 파라미터들의 설정을 수행한다. 우리는 파라미터 설정을 위해 가능한 모든 경우에 대한 실험을 수행하여 그 중에 가장 좋은 결과를 보이는 파라미터를 선정하는 나열적 방법(enumerative method)을 사용하였다. 나열적 방법을 사용하지 않고 실험계획법을 사용하여 나열적 방법이 가진 계산 부담을 줄이는 방법도 가능하지만 이 논문에서는 다루지 않도록 한다.

파라미터를 결정하기 위한 전산 실험은 50m×50m 크기의 센서 필드 안에 전개된 WSN 센서의 개수는 100개이며 모든 센서는 동일한 초기 에너지와 동일한 위치의 베이스 스테이션을 가진다고 가정하였다. 센서가 초기에 배치된 위치는 각각 다른 10가지를 가정하였다. 결정해야 할 4개의 파라미터는 헤드 선택 세부단계의 브로드캐스트 범위, p(파라미터 1), 변경 신호의 브로드캐스트 범위, x(파라미터 2), 적합성 값의 파라미터, α(파라미터 3), 타부리스트 크기의 파라미터, TL(파라미터 4)이다. <Table 1>은 실험에 사용한 파라미터들의 범위이다. 한 가지 센서 배치에 대하여 80,000회(= 20×20×10×20)의 실험을 수행하므로 10개의 센서 배치에 관해서는 전체 800,000회의 실험을 수행하였다.

Table 1. The range of parameters

	값의 범위	증가량	범위의 갯수
파라미터 1	6m~25m	1m	20개
파라미터 2	5%~100%	5%	20개
파라미터 3	0.05~0.50	0.05	10개
파라미터 4	1~20	1	20개

800,000회의 실험의 결과 찾아낸 파라미터의 최적 조건은 <Table 2>와 같고 이를 사용한 결과는 <Table 3>과 같다.

Table 2. Optimal solutions of parameters

	최적 값
파라미터 1	17m
파라미터 2	75%
파라미터 3	10
파라미터 4	20

Table 3. The result of experiments

평균 수명 (수명 = 첫 센서 에너지 고갈 기간)	2,498.6
표준편차	32.5
실험 횟수	800,000

지금 이 문제처럼 실험의 경우의 수가 매우 크지 않고 실험에 드는 시간 비용이 적을 경우 이와 같은 나열적 방법이 가능하다. 그러나 나열의 가짓수가 이보다 훨씬 많은 경우에 대한 나열적으로 실험을 수행하는 것은 현실적으로 어렵다. 이를 해결하기 위해서는 실험계획법을 사용하여 적은 수의 실험으로 만족할만한 결과를 얻을 수 있는 파라미터를 추정할 수 있다. Lee(2008)에서 SOC와 비슷한 자기 조직화된 클러스터링 방법에 관해 실험계획법을 사용한 파라미터 추정 방법이 연구된 바 있다.

4. 실험 및 결과

본 장에서는 본 연구가 제안한 SOC 방법의 성능 평가를 위한 전산 실험을 수행한다. 이 실험에서 사용된 컨트롤 패킷의 크기는 50바이트이며 데이터 패킷의 크기는 1,000바이트이다. 본 실험의 센서 필드 안에 전개된 센서의 개수는 100개이며 모든 센서는 동일하게 0.5J의 초기 에너지를 가진다고 가정한다. 또한 센서 필드의 크기는 50m × 50m이며 각 센서의 좌표는(x, y) (거리 단위는 미터(m))로 나타낸다. 베이스 스테이션의 위치는 (25, 150)로 고정시킨다. SOC 방법과 비교하고자 하는 방법으로는 무선 센서 네트워크를 위한 가장 널리 알려진 자기 조직화 알고리즘인 HEED 방법을 사용하였다. SOC 방법과 HEED 방법 모두 Visual Studio 2008의 Visual C++을 사용하여 시뮬레이션 하였고 이하 모든 실험은 서로 다른 10개의 센서 배치를 사용하여 성능의 평균을 비교하였다.

SOC는 클러스터 멤버들이 주변 환경에 대한 감지정보를 자신의 클러스터 헤드에게 전송하고, 클러스터 헤드들은 이를 병합하여 베이스 스테이션에게 직접 데이터 패킷을 전송하는 구조이다. 하지만 HEED는 클러스터 헤드들이 직접 베이스 스테이션에게 데이터 패킷을 전송하지 않고 클러스터 헤드들끼리 너비 우선 탐색 나무를 생성하여 이 경로를 따라 베이스 스테이션에게 데이터 패킷을 전송하는 간접 구조를 갖는다. 직접 전송과 너비 우선 탐색 나무 경로를 따른 간접 전송을 그대로 비교하면 두 방법의 성능차이를 제대로 비교할 수 없다. SOC, HEED 클러스터링 방법의 공정한 성능 평가를 위해 실험조건을 SOC형 직접 전송 구조와 HEED형 간접 전송 구조 두 가지 모두를 실험하였다.

첫 번째는 SOC, HEED 모두 클러스터 헤드들이 베이스 스테이션에게 데이터 패킷을 전송할 때 SOC처럼 클러스터 헤드

의 직접 전송 구조를 사용하는 것이다. 두 번째는 SOC, HEED 모두 HEED의 구조와 같이 클러스터 헤드들끼리는 너비 우선 탐색 나무를 사용하여 전송경로를 설정하여 라우팅을 하는 것이다. 이 논문에서는 이 두 가지 조건에 대하여 각각 3가지의 성능에 대해 비교 실험을 수행하였다. 첫 번째 실험은 수명 비교 실험이다. 두 번째 실험은 수명이 다했을 때의 잔여 에너지의 비교 실험이다. 세 번째 실험은 수명기간 동안의 평균 클러스터 헤드의 개수 비교 실험이다.

4.1 클러스터 헤드들의 직접 전송구조

우선 첫 번째 실험은 SOC의 구조에 맞추어 클러스터 헤드들이 데이터 패킷을 베이스 스테이션으로 직접 전송하는 구조에 대한 실험이다.

4.1.1 수명 비교

본 실험에서는 수명의 기준을 변화시키면서 SOC와 HEED의 클러스터 형성과 라우팅의 성능을 비교 분석하였다. WSN의 수명은 몇 개의 센서가 수명을 다하면 전체 WSN이 수명을 다했다고 판단하느냐에 따라 수명을 다양하게 정의할 수 있다. 본 실험에서는 첫 번째 센서의 에너지가 고갈될 때 WSN의 수명이 다하는 경우부터 20번째 센서의 에너지가 고갈될 때 WSN의 수명이 다하는 경우까지를 모두 비교하였다.

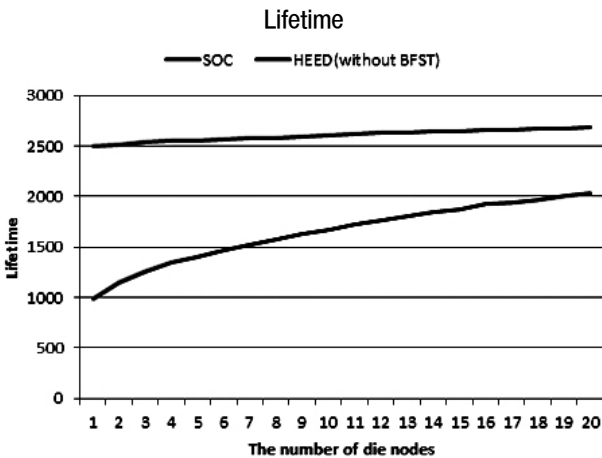


Figure 1. Lifetimes of SOC and HEED

<Figure 1>의 X축은 몇 개의 센서가 수명을 다한 것을 WSN 수명으로 정의하는 지를 나타내고, Y축은 기간으로 표현한 수명을 나타낸다. <Figure 1>을 보면 SOC는 HEED보다 1.33~2.54배 수명이 긴 것을 알 수 있다.

4.1.2 잔여 에너지 비교

본 실험은 SOC와 HEED의 수명이 다했을 때의 잔여 에너지를 비교하였다.

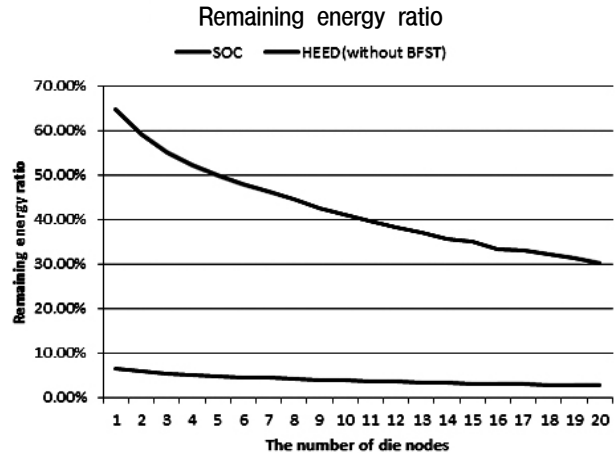


Figure 2. Remaining energy ratios of SOC and HEED

<Figure 2>의 X축은 몇 개의 센서가 수명을 다한 것을 WSN 수명으로 정의하는 지를 나타내고, Y축은 WSN이 수명이 다했을 때 WSN의 전체 잔여 에너지 비율을 나타낸다. <Figure 2>을 보면 SOC의 잔여 에너지는 HEED의 잔여 에너지의 1/10 수준에 불과하다. 즉, SOC는 WSN의 수명이 다한 경우에 활동 가능한 센서들의 잔여 에너지가 HEED에 비해 훨씬 작다.

4.1.1 실험과 4.1.2 실험을 함께 비교하면 SOC가 WSN의 수명이 높으면서 각 센서들의 에너지 소모량도 많다. 즉, SOC를 사용하면 WSN의 개개의 센서들의 에너지 소모의 균형을 잘 맞추어 몇몇 센서의 에너지가 빨리 고갈되지 않도록 잘 제어하기 때문에 전체 WSN의 수명이 길어진다고 해석할 수 있다.

4.1.3 평균 클러스터 수 비교

본 실험은 SOC와 HEED의 수명 동안의 평균 클러스터 헤드의 수를 비교하였다.

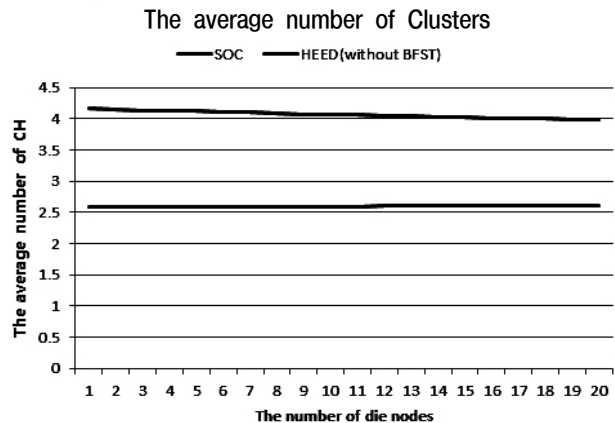


Figure 3. Average cluster heads of SOC and HEED

<Figure 3>을 보면 SOC의 평균 클러스터 헤드의 수는 2.6개, HEED의 평균 클러스터 헤드의 수는 4.1개이다. 즉, SOC는 HEED보다 상대적으로 큰 클러스터를 유지한다.

4.2 클러스터 헤드들의 너비 우선 탐색 나무 라우팅 구조

위의 첫 번째 실험 조건은 HEED의 너비 우선탐색 나무 구조를 빼고 헤드에서 베이스 스테이션으로 직접 전송 방식으로 바꾸었기 때문에 HEED에 불리한 실험 조건이다. 따라서 본 절에서는 두 번째 조건으로 클러스터 헤드에서 베이스 스테이션으로의 라우팅을 HEED에게 유리하게 하는 클러스터 헤드들간에는 너비 우선 탐색 나무 경로를 사용하는 구조로 바꾸어 실험을 수행하였다. 즉, 두 번째 실험은 클러스터 멤버에서 클러스터 헤드까지는 각각의 클러스터링 방법을 사용하여 전송 경로를 설정하고, 헤드에서 베이스 스테이션으로 전송시에는 너비 우선 탐색 나무를 통해 라우팅을 수행하는 구조에 대한 실험이다.

4.2.1 수명 비교

본 실험에서는 수명의 기준을 변화시키면서 라우팅 성능을 비교 분석하였다. 첫 번째 센서의 에너지가 고갈될 때까지의 수명 비교부터 20번째 센서의 에너지가 고갈될 때까지의 수명을 비교하였다.

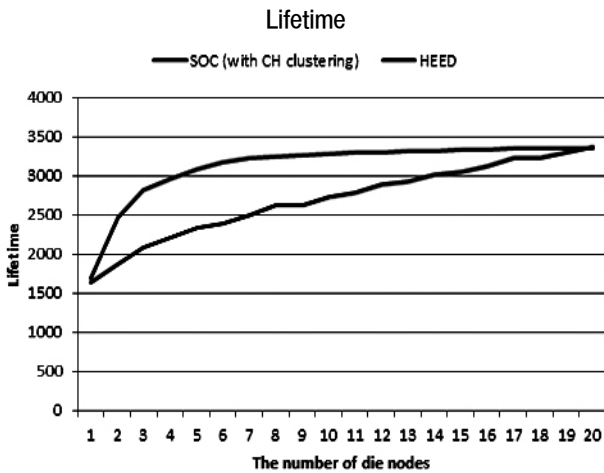


Figure 4. Lifetimes of SOC and HEED

<Figure 4>를 보면 1~19개까지의 센서의 에너지가 고갈 될 때까지는 SOC의 수명이 높고 20개의 센서의 에너지가 고갈 될 때는 HEED의 수명이 높은 것을 알 수 있다. 20개 이상의 센서의 에너지가 고갈된 시점에서는 HEED의 성능이 더 좋아질 수도 있지만 WSN에 설치된 20% 이상의 센서가 기능을 상실한다면 WSN 전체의 성능이 심각한 손상이 있으므로 이 논문은 20%의 센서의 에너지 고갈까지만 고려하였다.

4.2.2 잔여에너지 비교

본 실험은 SOC와 HEED의 수명이 다했을 때의 잔여에너지 비율을 비교 분석하였다.

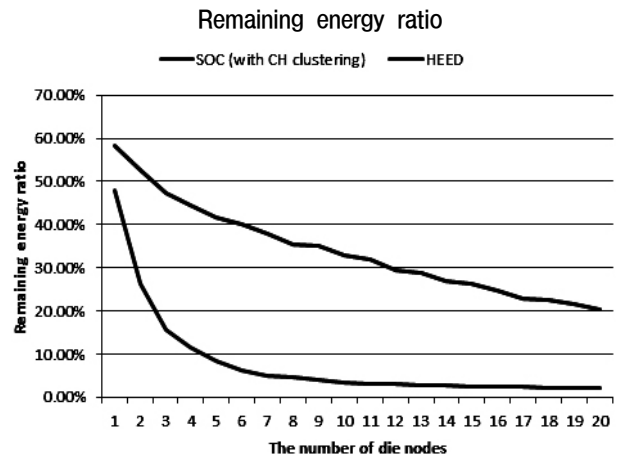


Figure 5. Remaining energy ratios of SOC and HEED

<Figure 5>을 보면 첫 번째 센서의 에너지가 고갈 되었을 때는 SOC, HEED 모두 잔여 에너지가 상당히 남아있다. 하지만 두 번째 센서의 에너지가 고갈될 때부터 두 클러스터링 방법의 잔여 에너지 차가 커지고 아홉 번째 센서의 에너지가 고갈 될 때부터 SOC의 잔여 에너지는 HEED의 잔여 에너지의 1/10 수준에 불과하다.

4.2.1 실험과 4.2.2 실험을 함께 비교하면 센서의 에너지가 고갈 될 때까지 SOC의 수명이 길고 잔여 에너지도 SOC가 HEED보다 매우 작다. 즉, 제안하는 SOC가 센서들의 에너지를 고르게 소모하므로써 전체적인 수명을 늘리는 속성을 갖는 것을 알 수 있다.

4.2.3 평균 클러스터 수 비교

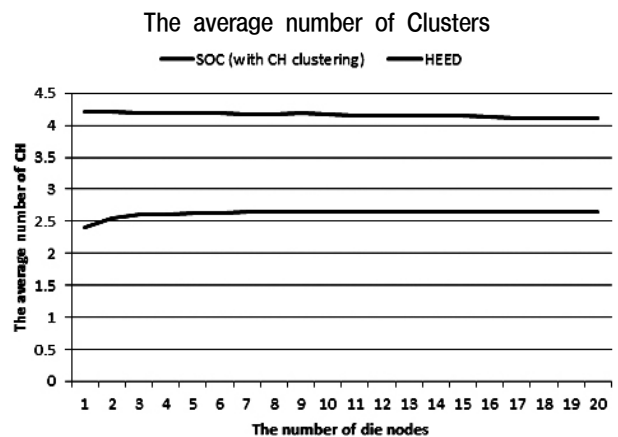


Figure 6. Average cluster heads of SOC and HEED

<Figure 6>을 보면 SOC의 평균 클러스터 헤드의 수는 2.6개, HEED의 평균 클러스터 헤드의 수는 4.2개이다.

SOC와 HEED 각각에 대해 4.1.3의 실험과 4.2.3의 실험의 결과 나타난 평균 클러스터 수는 거의 일정하다. 4.1.3의 실험과 4.2.3의 실험 각각에서 SOC와 HEED간에 평균 클러스터 수는

큰 차이가 있다. SOC는 본래 에너지 소비효율을 극대화 하는 것이 목표이기 때문에 상대적으로 큰 클러스터를 구성하여 에너지 소모가 큰 클러스터 헤드로부터 베이스 스테이션까지의 데이터 전송의 수를 줄여 에너지 소모를 줄인다. 하지만 HEED는 본래 클러스터 헤드들끼리의 너비 우선 탐색 나무의 형성으로 클러스터 헤드로부터 베이스 스테이션까지의 데이터 전송에 큰 무리가 없으므로 SOC보다 작은 클러스터가 많이 형성되는 것으로 분석된다.

4.3 두 가지 조건의 결과 분석

위의 두 실험 조건 전체에 대한 결과분석을 수행한다.

첫 번째, 위 두 가지 조건의 실험에서 수명과 에너지의 효율적인 사용 측면에서 SOC의 성능이 HEED보다 뛰어나다는 것을 알 수 있었다. SOC의 원형 디자인이 클러스터 헤드들이 베이스 스테이션에게로의 직접 전송 구조이기 때문에 첫 번째 실험 세트에서 성능이 높은 것은 당연하게 예측되었지만, HEED의 원형 디자인에 맞춘 두 번째 실험 세트에서도 SOC의 성능이 우수하다는 것을 알 수 있다.

두 번째, 첫 번째 결과 분석으로부터 SOC가 HEED보다 자기 조직화가 뛰어나다는 것을 알 수 있다. HEED의 경우, 클러스터 헤드들끼리의 라우팅 경로 설정이 없는 원형 디자인이 아닌 경우(제 4.1절의 실험) 수명이 크게 줄었다. 하지만 SOC의 경우 원형 디자인이 아닌 경우(제 4.2절의 실험)에도 클러스터 헤드들끼리의 라우팅 경로 설정 유무가 성능에 큰 영향을 미치지 않았다. 따라서 SOC는 클러스터 상호간을 연결하는 구조가 바뀌는 경우에도 자기 조직화 능력이 뛰어나다고 할 수 있다.

세 번째, 위의 두 실험 조건 모두에서 수명비교 그래프 <Figure 1>, <Figure 4>를 살펴보면 두 클러스터링 방법의 큰 차이점을 볼 수 있다. SOC는 두 번째 조건하의 실험에서 처음 세 개의 센서의 에너지가 고갈 될 때까지의 수명만이 차이가 클 뿐 다른 부분에서는 큰 차이를 나타내지 않았다. 하지만 HEED는 두 조건하의 실험 모두에서 일차함수적인 수명 변화를 보이고 있다. 이는 SOC가 자기 조직화가 잘 되어 클러스터들을 계층적으로 구성하여도 그 성능이 크게 줄어들지 않음을 보여준다.

4.4 강건성 검사

본 실험은 HEED와의 비교 없이 SOC만을 가지고 수행하는 SOC의 자기 조직화 성능을 평가하는 첫 번째 추가 실험이다. 이 실험에서는 앞선 실험과 달리 센서가 고장나거나 기능을 상실할 수 있다고 가정한다. 센서 네트워크의 수명은 특정수의 센서가 작동하지 않을 때까지의 기간을 수명으로 정의하였으므로, 이 실험에서는 작동하지 않는 센서의 수를 계산할 때 에너지가 고갈된 센서의 수와 고장나거나 기능을 상실한 센서

의 수를 합한다.

이 실험에서 센서의 고장 또는 기능 상실은 클러스터 헤드에서도 일어날 수 있다고 가정한다. 데이터 전송 단계에서의 클러스터 헤드의 고장 또는 기능 상실은 클러스터링 기반의 라우팅 자체를 불가능하게 할 수 있다. 따라서 SOC 클러스터링의 원형 디자인에 ‘헤드 백업 메커니즘’을 추가한다. 헤드 백업 메커니즘은 클러스터 헤드가 고장 또는 기능 상실로 클러스터 헤드의 역할을 수행할 수 없는 경우 클러스터 헤드와 가장 가까운 클러스터 멤버를 백업 헤드로 설정하는 것이다. 이를 위해서 SOC의 클러스터링 단계에서 클러스터 헤드는 가장 가까운 클러스터 멤버를 백업 헤드로 설정하고 데이터 전송 단계에서 매 전송 시마다 둘 간의 통신을 추가적으로 수행한다. 만약 백업 헤드가 클러스터 헤드로부터 메시지 전송을 받지 못하면 클러스터 헤드가 고장 또는 기능 상실했다고 판단하여 백업 헤드가 자신이 속한 클러스터 범위에 헤드 신호를 전송하여 클러스터 헤드의 역할을 수행한다.

이 실험에서 센서의 고장 또는 기능 상실 이벤트를 추가하기 위하여 고장이 일어나는 시간이 지수분포 함수를 따른다고 가정한다. 즉, 센서의 고장률이 λ 로 일정하고 센서의 평균수명 $\theta (= 1/\lambda)$ 는 25,000기간의 지수분포를 따른다고 가정한다. 이 가정 하에 실험을 수행하면 고장 또는 기능 상실이 발생하는 센서의 수는 WSN의 수명 중에 평균 11개가 발생한다. 여기에 에너지 고갈로 수명이 다한 센서를 합쳐 수명을 계산한다.

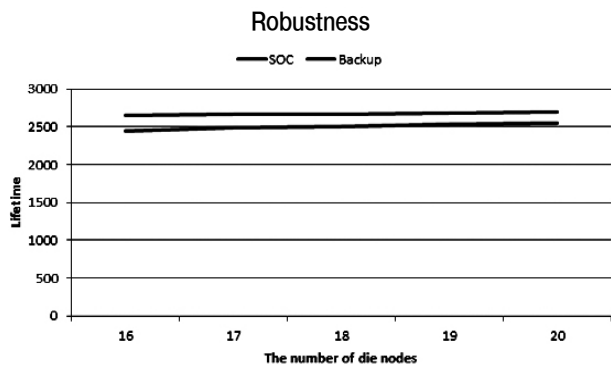


Figure 7. Robustness

<Figure 7>은 16~20개의 센서의 에너지가 고갈될 때까지의 수명을 나타내고 있다. 1~15개의 센서의 에너지가 고갈될 때까지의 수명은 고장에 의해 수명을 다하는 센서의 수(평균 11개)에 의해 크게 좌우되기 때문에 고려하지 않았다.

이 실험에서 고장이 발생하고 헤드 백업 메커니즘을 수행한 모델의 성능은 이를 고려하지 않은 SOC 원형 모델과 비교하여 92%~95%의 성능을 보인다. 이는 예기치 않은 센서들의 고장에도 SOC 클러스터링 방법이 상당한 강건성을 보이고 있다고 할 수 있다. 그러므로 SOC는 센서들의 고장에도 큰 영향을 받지 않고 뛰어난 자기 조직화된 성능을 보인다고 판단할 수 있다.

4.5 불확실성 적용

본 실험은 SOC의 자기 조직화된 성능을 평가하는 두 번째 추가 실험이다. 이 실험에서는 주변 환경 조건의 불확실성에 따른 에너지 소비의 변화를 가정한다. 예를 들어, WSN은 무선 통신이기 때문에 날씨, 온도, 습도 등에 따라 전송에 따른 에너지 소비가 영향을 받을 수 있다. 1차 무선 전파 모델에는 날씨나, 온도, 습도의 조건이 반영되지 않았으므로 패킷 전송에 따른 에너지 소비를 직접 변경하여 에너지 소비의 불확실 상황을 가정한다. 즉, 1차 무선 전파 모델의 에너지 소모를 100%라 가정하고 이에 $\pm\alpha\%$ 의 에너지 소모 비율 변화를 불확실성을 대변하는 확률 변수로 가정한다. $\alpha = 10, 30, 50(\%)$ 의 세 가지 경우에 대해 실험을 수행하였다. 에너지 소모 비율 변화는 모든 센서에 대해 개별적으로 일어나고 매 기간마다 일어날 수 있다고 가정한다.

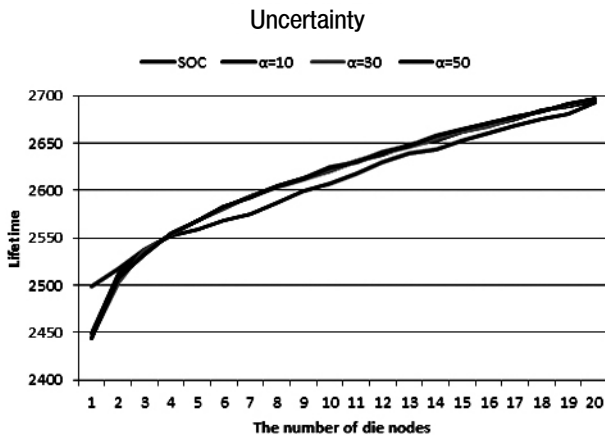


Figure 8. Uncertainty

<Figure 8>을 보면 본래 SOC와 불확실성 변수 $\pm\alpha\%$ 의 성능차이가 2% 내외로 거의 변동이 없다. 이는 SOC 클러스터링 방법이 현재의 에너지 상태를 기준으로 다음 상태를 정하기 때문에 불확실성에 의해 에너지 소비가 WSN 설계시와 다르게 다소 불확실해져도 클러스터링과 라우팅에 관련한 자기 조직화된 성능이 적응해나가기 때문이다. 위의 결과에 따라 SOC는 불확실성의 조건하에서도 뛰어난 자기 적응 능력을 보인다고 판단할 수 있다.

5. 결론

본 논문은 자기 조직화된 모델을 사용하여 센서 네트워크의 에너지 효율이 높은 클러스터링 기반 자기 조직화된 방법을 제안하였다. 제안한 방법은 자기 조직화 시스템을 지향하여 각각의 센서들이 서버나 외부의 도움 없이 클러스터를 형성하고 이를 기반으로 라우팅을 수행할 수 있다. 전산 실험을 통해 기존의 자기 조직화된 클러스터링 방법보다 우수한 것을 알

수 있었다.

추후 연구과제로는 클러스터 크기나 헤드의 수가 WSN의 수명에 미치는 영향을 분석하여 이를 자기 조직화에 이용해 WSN의 수명을 극대화하고 자기 조직화 능력을 증가시키는 방향의 연구가 가능하다. 또한 WSN의 수명은 후반기에 센서들의 남은 에너지를 어떻게 효과적으로 사용하느냐에 상당한 영향을 받으므로 WSN의 수명이 변하면서 전반기와는 다른 적응 능력을 발휘하도록 하는 방법에 대한 연구 등도 유망하다.

참고문헌

- Al-Karaki, J. N. and Kamal, A. E. (2004), Routing Techniques in Wireless Sensor Networks : A Survey, *IEEE Wireless Communications*, **11**(6), 6-28.
- Chang, W. Y. (2007), Network-centric Service-oriented Enterprise, Springer.
- Chang, Yao-Chung, Lin, Zhi-Sheng, and Chen, Jiann-Liang (2006), Cluster Based Self-Organization Management Protocols for Wireless Sensor Networks, *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, **52**(1), 75-80.
- Heinzelman, W. R., Kulik, J., and Balakrishnan, H. (1999), Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks, *International Conference on Mobile Computing and Networking*, 174-185.
- Oh, S., Hur, S., and Lee, G. (2010), An Efficient Energy Usage of Wireless Sensor Network, *IE Interface*, **23**(2), 109-118.
- Dressler, Falko (2007), Self-Organization in Sensor and Actor Networks, WILEY, New York, USA.
- Dressler, Falko (2008), A Study of Self-organization Mechanisms in Ad Hoc and Sensor Networks, *Computer Communications*, **31**, 3018-3029.
- Heinzelman, W. R., Chandrakasan, A., and Balakrishnan, H. (2000), Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks, *IEEE Hawaii International Conference on System Science*, **2**, 1-10.
- Lee, H., Lee, K. H., and Lee, Y. H. (2008), A Self-Organized Head Selection for Hierarchical Routing in Wireless Sensor Networks, *LNCS*, **5343**, 206-217.
- Lee, K. H. and Lee, Y. H. (2008), Self-Adaptable Cluster Configuration for Wireless Sensor Networks, *Proc. Korea Association of RFID/USN*, 4th RFID/USN Contest, 125-133.
- Lee, K. H. (2008), A Self-Organized Cluster Configuration Algorithm and Experimental Design for Parameter Settings, *Proc. Conf. on Korean Institute of Industrial Engineering*, Seoul, Korea.
- Mahfoudh, S. and Minet, P. (2008), Survey of energy efficient strategies in wireless ad hoc and sensor networks, *Proc. IEEE International Conference on Networking*, 1-7.
- Marinescu, D. C., Marinescu, G. M., and Chen, Yu (2008), Self-Organizing Sensor Networks, *Proc. IEEE Wireless Pervasive Computing*, 288-292.
- Prehofer, Christian and Bettstetter, Christian (2005), Self-Organization in Communication Networks : Principles and Design Paradigms, *IEEE Communications Magazine*, **43**(7), 78-85.
- Rogers, Alex, Esther, David, and Jennings, N. R. (2005), Self-Organized Routing for Wireless Microsensor Networks, *IEEE Trans-*

- actions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A : Systems and Humans*, **35**(3), 349-359.
- Sakhae, E., Wakamiya, N., and Murata, M. (2008), Self-Adaptability and Organization for Pervasive Computing and Sensor Network Environments Using a Biologically-Inspired Approach, *Proc. IEEE Parallel and Distributed Processing with Applications*, 892-895.
- Yick, Jennifer, Mukherjee, Biswanath, and Ghosal, Dipak (2008), Wireless Sensor Network Survey, *Computer Networks*, **52**(12), 2292-2330.
- Younis, Ossama and Fahmy, Sonia (2004), HEED : A Hybrid Energy-Efficient, Distributed Clustering Approach for Ad-hoc Sensor Networks, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, **3**(4), 366-379.