

무선 센서 망에서 생체 시스템 기반 에너지 효율적인 노드 스케줄링 기법

손재현*, 손수국*, 변희정°

Bio-Inspired Energy Efficient Node Scheduling Algorithm in Wireless Sensor Networks

Jae-hyun Son*, Su-goog Shon*, Hee-jung Byun°

요약

센서 네트워크에서 기본적으로 고려되어야 하는 것은 센서 노드의 에너지 소모 문제이다. 이를 해결하기 위해 많은 연구들이 진행되어 왔지만 에너지 소모 문제와 더불어 트레이드오프 관계를 갖는 지연 문제도 간과할 수 없는 부분이다. 본 논문은 생체시스템을 모방하여 무선 센서망에서 에너지의 소모와 지연시간을 줄이기 위한 BISA(Bio-inspired Scheduling Algorithm)를 제안한다. BISA는 에너지 효율성이 높은 라우팅 경로를 탐색하고 다중채널을 이용하여 데이터 전송의 경로를 다중화하여 데이터 전송을 위한 에너지 소모와 지연시간을 최소화한다. 모의실험을 통해 제안한 방식이 효율적으로 에너지를 소모함과 동시에 요구지연시간을 보장함을 확인한다.

Key Words : bio-inspired system, scheduling, multi-channel, energy-efficiency, wireless sensor Network

ABSTRACT

The energy consumption problem should be taken into consideration in wireless sensor network. Many studies have been proposed to address the energy consumption and delay problem. In this paper, we propose BISA(Bio-inspired Scheduling Algorithm) to reduce the energy consumption and delay in wireless sensor networks based on biological system. BISA investigates energy-efficient routing path and minimizes the energy consumption and delay using multi-channel for data transmission by multiplexing data transmission path. Through simulation, we confirm that the proposed scheme guarantees the efficient energy consumption and delay requirement.

I. 서론

센서 네트워크는 센서 노드와 싱크노드로 구성되어 있으며, 근거리 통신뿐만 아니라 노드의 멀티홉 라우팅을 통하여 원거리 통신도 가능하다. 또한 센서 노드들을 통해 비교적 쉽고 저렴한 비용으로 네트워크 환경을 구축할 수 있다는 장점으로 인해 여러 분야에서

정보 수집과 실시간 감시등 다양한 목적으로 활용되어지고 있다. 하지만 센서 노드는 소형 배터리를 사용하여 저전력의 제한된 용량을 가지며, 센서 노드는 특정 지역에 무작위로 뿌려져 데이터를 수신하고 다른 노드로 전송하는 방식을 이용하기 때문에 한번 구성되어진 노드의 배터리 교체가 어렵다는 문제가 있다. 그래서 효율적 에너지 소비의 문제는 센서 네트워크

※ 본 연구는 경기도의 경기도지역협력연구센터(GRRC SUWON 2012-B5)의 사업의 일환으로 수행하였습니다.

◆ 주저자 : 수원대학교 정보통신공학과, devia07@naver.com, 학생회원

° 교신저자 : 수원대학교 정보통신공학과, heejungbyun@suwon.ac.kr, 정회원

* 수원대학교 정보통신공학과, sshon@suwon.ac.kr

논문번호 : KICS2013-02-106, 접수일자 : 2013년 2월 27일, 최종논문접수일자 : 2013년 5월 15일

에서 중요한 문제들 중 한가지로 지적되고 있으며, 이를 해결하기 위한 연구들이 많이 진행되어 왔다¹⁻³⁾. 하지만 에너지 소모의 문제를 해결하기 앞서 트레이드오프 관계를 갖는 전송지연에 관한 문제도 에너지 소모의 문제와 상호적 관계로써 생각해 보아야한다. 센서 네트워크는 원거리의 데이터를 전달하기 위해 멀티홉 라우팅을 통해 싱크 노드로 데이터를 전달한다. 이 때 수신 노드는 데이터를 받기 위해 깨어있는 상태에 있어야 한다. 수신 노드가 오랜 시간동안 깨어있는 상태를 유지하고 있으면 전송지연을 줄일 수 있지만 노드가 수면상태를 유지할 경우 에너지 소모는 최소화하는 대신 송신 노드로부터 데이터를 받을 수 없어 지연이 발생하게 된다. 센서 네트워크에서는 지연시간과 관련된 문제를 해결하기 위해 다중채널이 많이 이용되어 왔다. 다중채널은 하나의 채널을 통해 전송하게 될 경우 발생하게 되는 지연시간의 문제를 채널의 수를 늘려 동시에 데이터를 전송함으로써 문제를 해결할 수 있다. 하지만 다중채널은 여러 채널을 사용하기 때문에 데이터 전송의 효율이 높은 채널을 선택하는 문제가 다중채널의 과제로 남아있는 부분이다. 본 논문에서는 생체시스템기반 노드 스케줄링 알고리즘 BISA (Bio -inspired Scheduling Algorithm)를 제안하고 다중채널을 이용하여 제어 패킷의 수를 최소화하여 노드의 에너지 소모 문제와 지연시간 문제를 효율적으로 제어하고자 한다.

II. 관련연구

센서 네트워크의 에너지 소모를 최소화하기 위한 연구는 크게 두 가지 방법으로 나눌 수 있다. 첫째로 Duty Cycle을 조절하여 에너지를 제어하는 방법이다. 에너지 소모를 최소화하기 위한 대표적인 MAC프로토콜인 S-MAC¹⁾은 활동구간과 수면구간을 고정적으로 유지하여 에너지 소모를 줄이고자 제안하였다. 이러한 경우 데이터 전송이 끝난 상태에서도 Active 상태가 유지되어 에너지 낭비가 발생하게 된다. S-MAC의 문제 해결방안으로 평균지연을 통하여 특정노드의 전송지연이 크다고 판단되어질 경우, 많은 데이터 전송이 필요한 송신노드와 수신노드의 Duty Cycle을 동일한 비율로 조절 하고, 주변의 이웃노드들은 기존의 Duty Cycle을 유지하면서 데이터를 수신하지 않는 시간에 Active 상태가 증가하지 않게함으로써 에너지 낭비를 줄이도록 하는 알고리즘을 제안하였다²⁾. 라우팅을 통한 에너지 소모 최소화의 방법은 노드간 전송 경로의 최소화로 Cost기반 최단 라우팅 경로를 통해

데이터를 전송하는 방법이 제안되었다³⁾. 그러나 동일한 홉을 갖는 많은 노드가 존재하게 될 경우 거리가 먼 노드를 다음 노드로 선택하여 에너지 소모가 커지는 문제가 발생한다. 이전에는 에너지의 소비를 최소화하여 노드의 수명을 최대화하기 위한 연구가 많이 진행되었지만 최근에는 에너지 문제와 함께 지연시간을 최소화하는 연구가 활발히 진행되어왔다⁴⁻⁶⁾. 전송지연은 노드의 에너지 소모 최소화를 위해 수면시간이 길어질수록 지연시간이 증가하기 때문에 송신노드에서 데이터를 전송하기 이전에 수신노드에게 데이터 전송을 알리는 제어패킷을 전송하는 방법들이 다양하게 제안되었다^{4,5)}. 이러한 경우 많은 제어패킷 사용으로 노드의 에너지 낭비 문제가 발생한다. Adaptive backoff기법⁶⁾에서는 노드의 깊이에 따라 다른 Duty Cycle 시간을 적용하여 하위노드에서 순차적으로 데이터를 상위노드로 전송하는 알고리즘을 제안하였다. 하지만 하나의 계층에 여러 노드가 존재하게 되는 경우 모두 동일한 Back-off time을 갖게 되어 상위 계층으로 패킷 전달 시 패킷 충돌의 문제가 발생한다. 위와 같은 문제해결 방안으로 다중 채널을 이용하여 데이터의 전송을 분산시켜 전송지연을 줄이기 위한 방법들이 제안되고 있다^{7,8)}. LQ-MCMAC⁷⁾은 링크 품질에 따른 전송을 위해 RSSI(Received Signal Strength Indication) 임계값을 이용하여 전송 효율이 높은 채널을 선택함으로써 데이터를 전송하는 방법을 제안하였다. RSSI값이 높은 경우 모든 노드가 하나의 채널로만 쏠리게 되고 RSSI값이 조금 낮은 채널의 경우에는 노드의 점유가 적게되는 문제가 발생한다. 이로 인해 특정 채널만 전송채널로 사용되어 전송지연이 발생할 수 있다. 예약기반 다중채널 CSMA MAC 프로토콜⁸⁾은 다중채널을 이용하여 데이터 전송 중 다른 노드로부터의 전송요청이 발생하는 경우 전송요청을 예약하여 노드가 전송을 위한 경쟁을 최소화하여 재전송으로 인해 발생하는 전송지연을 최소화하는 방법이 제안되었다. 문제점으로 전송중인 채널의 데이터 전송 중 재전송이 발생하게 되었을 경우 이후 데이터의 전송에 지연이 점차적으로 증가할 수 있다. 제시되어진 기존의 연구들의 전체적인 문제는 노드 수가 많아지거나 네트워크 규모가 커질수록 시스템 전반적인 성능이 저하되거나 알고리즘이 안정적으로 동작하지 않는다는 것이다⁹⁾. 이러한 문제들을 해결하기 위해 본 논문은 다중채널 환경에서의 생체시스템기반 노드 스케줄링 알고리즘을 제안한다. 생체시스템 기반 센서 네트워킹은 요즘 가장 떠오르고 있는 연구 방법으로 새 또는 곤충등의 행동 패턴을 모태로 하여 센서 네트

워크에 적용시키는 것을 말한다. 생체기반 알고리즘은 각 노드들 간 정보를 상호적으로 공유하며 자신의 행동을 결정한다. 이는 중앙의 노드에 의해 제어되지 않고 독립적으로 동작하게 된다. 또한 무수히 많은 노드들은 중앙노드 오류로 발생하는 문제에 자유롭다는 점이 생체기반 센서 네트워킹의 장점이라 할 수 있다. 본 논문은 생체 시스템을 무선 센서 네트워크 환경에 적용하여 완전히 분산적 행동을 보장하면서 동시에 에너지 소모와 지연에 관한 문제를 효율적으로 제어할 수 있는 방법을 제안하고자 한다.

III. 제안 알고리즘

3.1. 생체모방 스케줄링 알고리즘

3.1.1. Ant Colony Optimization(ACO)

본 논문에서는 생체모방 알고리즘의 하나인 Ant Colony Optimization(ACO)^[10]을 적용한다. ACO 알고리즘은 Dorigo(1992)에 의해 처음 소개되어진 기법으로서 개미가 출발지에서 최종 목적지까지 이르는 여러 경로들 중에서 최단 경로를 찾기 위한 기법이다. 이 알고리즘은 개미가 이동 중 먹이를 발견한 후 돌아오는 경로에 자신의 페로몬을 이동경로에 남겨둔다. 페로몬은 시간이 지날수록 증발하게 되고, 개미의 이동이 잦은 경로는 페로몬이 쌓이게 됨으로써 개미들은 페로몬향으로 많은 페로몬이 남아있는 경로를 선택하여 먹이가 있는 목적지까지 이동하는 알고리즘이다.

그림 1은 개미가 임의의 경로를 선택하면서 최단 경로를 찾는 과정을 보여준다. 개미는 처음 출발지에서 먹이가 있는 목적지까지 도달하기 위하여 여러 경로를 거쳐 목적지까지 도달한 후, 출발지점으로 돌아오는 경로에 자신의 페로몬을 방출한다. 이후 출발지점에서 목적지로 향하는 개미들은 자신보다 먼저 출발하여 목적지에서 돌아온 개미들이 방출한 페로몬을 따라 목적지로 향한다. 많은 개미들이 여러 경로를 통하여 이동을 하지만 거리가 먼 경로의 페로몬은 개미들의 이동간격이 크기 때문에 증발하고 거리가 짧은 경로일수록 개미들의 이동간격이 좁기 때문에 페로몬이 축적되어 많은 양의 페로몬이 쌓이게 되고, 개미들은 페로몬이 많은 경로를 통해 이동하면서 페로몬은 목적지로 향하는 하나의 이동경로에 남게 되고, 최종 목적지까지 이르게 되는 최단경로가 결정되어진다. 여기서는 소단원에 관한 내용을 간단히 살펴본다.

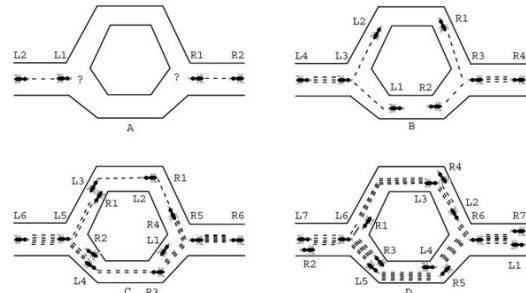


그림 1. 개미가 최단 경로를 찾는 방법^[11]
Fig. 1. How real ants find a shortest path^[11]

3.1.2. ACO기반 알고리즘 구조화

그림 2는 나무를 개미의 이동경로와 노드의 목적지로 나타내고 이를 센서 네트워크에 적용하기 위해 개념적으로 표현한 것이다. 나무의 뿌리는 개미의 출발 지점으로써 송신노드로, 나무의 가지는 개미의 이동경로로써 센서노드의 라우팅 경로로, 그리고 나무의 나뭇잎은 개미의 목적지 중 한 지점으로써 송신노드의 이웃노드로 나타내었다. 싱크노드는 패킷을 브로드 캐스팅한다. 그리고 패킷을 수신한 모든 이웃 노드들은 패킷에 포함된 정보와 자신의 정보를 Path metric 값을 갱신한다. 이후 각 노드들은 자신의 Path metric 값을 결정하고 주기적으로 이웃노드들에게 전송하게 된다.

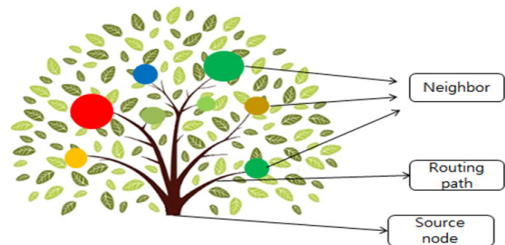


그림 2. 센서네트워크의 생체모방 알고리즘 구조화
Fig. 2. Bio inspired Algorithm structure of sensor network

표 1. ACO로부터 BISA로의 사상
Table 1. mapping from ACO to BISA.

| ACO | BISA |
|------------------------|---|
| Ant point of departure | Source node |
| Destination | Sink Node |
| Ant | Packet |
| Pheromon release | Path metric |
| Shortest path | Path metric values with the highest sequence of nodes |

그리고 이웃 노드들은 수신한 Path metric값을 저장하고 자신이 전송할 데이터가 있는 경우 이웃 노드 중 Path metric값이 가장 큰 노드를 선택하여 전송한다. 표 1은 ACO를 센서 네트워크에 적용하여 표현한 구조도를 보여준다.

3.1.3. Initialization

싱크 노드에서 자신의 홉 수를 0으로 하여 패킷을 브로드캐스팅 한다. 패킷은 노드로 전달되어 질 때마다 홉 수가 1씩 증가하게 되며 패킷을 수신한 노드는 패킷에 적힌 홉 수를 보고 자신의 홉 수를 결정하게 되고 자신의 홉 수가 적힌 패킷을 다시 이웃 노드로 브로드캐스팅 한다. 이 과정을 반복하여 네트워크 상의 모든 노드가 홉 수를 설정하게 된다.

3.1.4. 노드선택

노드 선택을 위한 Path metric을 다음과 같이 F 로 정의 한다.

$$F = (E_0 - E_c) / H \quad (1)$$

E_0 는 전체 에너지, E_c 는 현재까지 소모된 에너지, H 는 해당 노드에서 싱크 노드까지의 홉 수이다. F 는 노드에 남아있는 에너지량을 싱크 노드까지 Hop count값으로 나눈 값을 의미한다. 각 노드들은 주기적으로 자신의 F 값을 이웃 노드에게 알리고 전송할 데이터가 있는 노드는 이웃 노드의 F 값을 이용하여 가장 큰 F 값을 가지는 노드를 다음 노드로 선택한다.

3.1.5. 채널 선택

채널 선택을 위해 각 노드는 채널별 RTT(Round Trip Time)를 측정하고 다음의 식을 이용하여 필터링된 RTT(RTT_a)값을 저장한다.

$$RTT_{i,new} = (1 - \alpha)RTT_{i,past} + \alpha \times RTT$$

$$RTT_a = RTT_{i,new} \quad (2)$$

여기서, $RTT_{i,past}$ 는 채널 i 의 저장된 RTT값이며, $0 \leq \alpha \leq 1$ 이다.

채널 선택을 위한 RTT임계값 (γ)은 구간 $[0, (2D_{req})/H]$ 에서 uniform한 분포를 갖는 랜덤값으로 결정된다.

$$\gamma \sim U(0, (2D_{req})/H) \quad (3)$$

여기서 D_{req} 는 요구 지연시간이다. 요구지연시간은 데이터 수신 시 수용할 수 있는 최대 지연시간을 의미한다. 선택되어진 채널의 RTT_a 값과 γ 를 비교하여 RTT_a 값이 γ 보다 작은 값을 갖는 경우 처음 선택한 RTT_a 채널을 통해 패킷을 전송한다. 하지만 채널의 RTT_a 값이 γ 보다 큰 경우 다른 채널의 RTT_a 값을 γ 와 비교하여 선택하게 되는데 이때 다른 채널의 RTT_a 값은 각 노드들의 테이블에 저장된 이전 데이터 패킷 전송을 통해 구해진 채널의 RTT_a 값을 γ 와 비교한다. 채널의 RTT_a 값이 γ 보다 작다면 선택한 채널을 통해 패킷을 전송하고 γ 보다 큰 경우 채널들 간의 RTT_a 값을 비교하여 가장 작은 RTT_a 값을 갖는 채널을 선택하여 패킷을 전송한다.

IV. 성능평가

4.1. 실험 환경

제안한 BISA의 성능을 확인하기 위해 MCRT(Multi-channel real-time communication protocol)^[12]와 Energy Efficient Routing 알고리즘^[13]을 비교알고리즘으로 하였다. MCRT알고리즘은 우리가 제시한 알고리즘 동작환경과 유사하게 멀티채널을 이용한 라우팅 기법을 제안하였기에 비교 알고리즘으로 이용한다. 그리고 Energy Efficient Routing 알고리즘은 우리가 제시한 라우팅 알고리즘이 얼마나 효율적으로 라우팅 경로를 설정하는가를 비교하기 위해 이를 비교 알고리즘으로 이용하고자 한다. MCRT는 노드간 거리 기반 라우팅으로 노드간 패킷 전송 임계값에 포함되는 값을 갖는 경로를 선택하여 노드간 최단 라우팅 경로를 적용한 방식이다. 그리고 Energy Efficient Routing은 Mac을 포함한 라우팅 알고리즘으로 노드간 최단 경로를 갖는 노드를 다음 경로로 지정하며, 전송노드와 수신 노드 외의 노드는 수면 상태를 유지하여 노드의 에너지를 최소화하는 알고리즘이다. 세 알고리즘의 방식에 대해 MATLAB을 이용하여 시뮬레이션 하였다. 실험 환경은 임의의 영역에 20개의 센서 노드를 랜덤하게 배치하였다. 채널의 수를 10개로 하여 노드에 남아있는 에너지의 양과 전송지연 시간을 비교해 보았다.

표 2. 시뮬레이션 파라미터
Table 2. Simulation Parameter

| Variable Name | Values |
|-------------------------|-------------|
| Number of nodes | 20 Nodes |
| Number of packets | 10 Packets |
| Number of channels | 10 Channels |
| Packet size | 127 bytes |
| Data rate | 20 kbps |
| Minimum channel quality | 0.075 |
| Maximum channel quality | 0.75 |

BISA에서는 생체모방 기법의 일종인 ACO방법을 적용하여 송신노드에서 이웃 노드들을 거쳐 최종 목적지인 싱크 노드로 패킷을 전달하도록 하였으며 각 노드들이 가지고 있는 홉 수와 남아있는 에너지의 양의 값에 대한 연산을 이웃노드들로 전송하고 수신한 값들 중에 최대값을 갖는 노드를 포워딩노드로 선택하도록 하였다. 그리고 선택된 노드에서 노드가 갖는 채널들 중 채널의 임계값(λ)보다 작은 RTT값을 갖는 채널을 우선적으로 선택하고 모든 채널이 임계값(λ)를 초과하는 경우 가장 작은 RTT값을 갖는 채널을 선택하여 데이터를 전송하는 방법으로 실행하였다. CSMA Mac Protocol을 적용하여 송신노드와 수신노드의 패킷 송수신을 Overhearing 하여 채널의 RTT를 구하고 갱신하게 된다. 다음은 모의실험에 사용될 파라미터 값이다.

4.2. 실험 결과

그림 3은 패킷을 전송하는 송신노드의 수를 1개 부터 10개까지 증가시켰을 때 전체 20개의 노드에 남아있는 에너지 양을 전체 에너지에 대한 비율로 나타내었다. BISA 알고리즘은 송신노드의 수가 증가하여도 적은 양의 에너지가 감소하는 반면 MCRT 알고리즘은 송신노드의 수가 증가함에 따라 남아있는 에너지의 양이 급격한 감소를 나타내었고 Energy Efficient Routing은 비교적 안정적인 에너지 소모를 나타내었지만 BISA 알고리즘이 좀 더 적은 에너지 소모를 나타내었다. BISA에서는 각 노드에서 전송한 데이터 패킷의 재전송이 적었던 반면 MCRT 알고리즘은 패킷의 재전송이 많아지면서 에너지 소모가 많았고 Energy Efficient Routing은 싱글채널을 이용한 데이터 전송으로 재전송이 많았지만 MCRT보다 적은 경로를 이동하였기 때문에 MCRT보다는 에너지 효율이 높았음을 확인하였다.

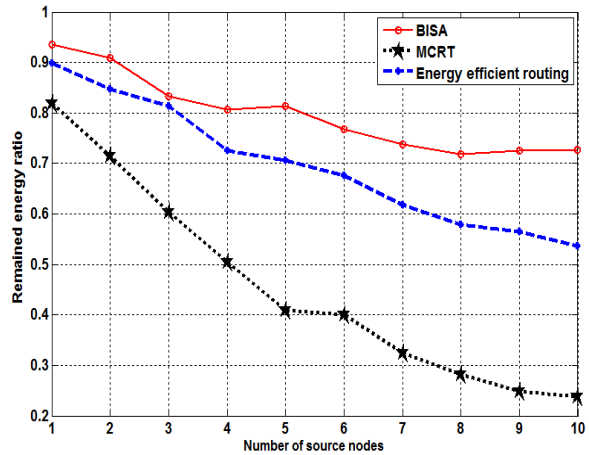


그림 3. 송신노드 수에 따른 평균 잔여 에너지율
Fig. 3. Average residual energy ratio varying the number of source nodes

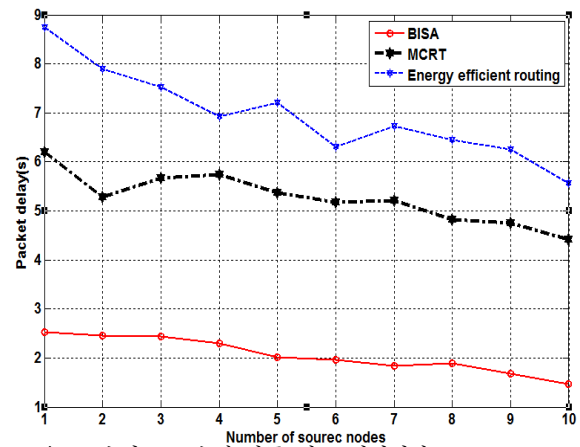


그림 4. 송신노드 수에 따른 평균 지연시간
Fig. 4. Average delay time according to the number of source nodes

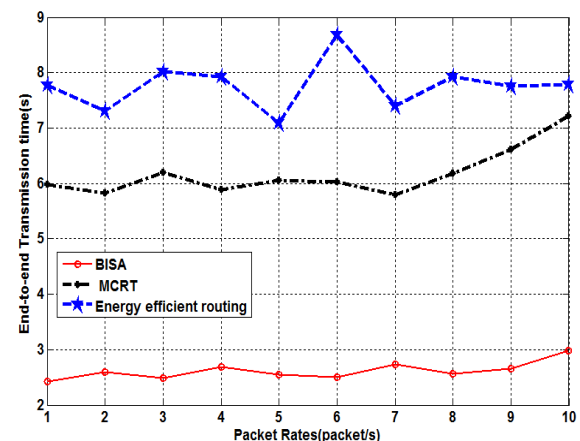


그림 5. 전송패킷 수에 따른 종단간 전송시간
Fig. 5. End-to-end transmission time according to the number of transmission packets

노드의 패킷 재전송이 많아짐에 따라 노드의 에너지 고갈로 이어져 중간 전송경로의 손실이 발생하여 데이터패킷이 싱크노드까지 완전히 전송되지

못하는 문제가 발생할 수 있다. 그림 4에서는 송신 노드의 수를 증가시켜가면서 패킷의 지연시간을 확인하였다. 요구되어지는 지연시간을 3초로 하여 결과를 확인하였을 때 BISA는 송신노드의 수가 증가하여도 지연시간이 3초보다 작은 지연시간을 나타내지만 MCRT와 Energy Efficient Routing은 모두 4초를 초과하는 지연시간의 결과를 나타내었다. 지연시간이 요구되어진 지연시간을 초과함으로써 감시나 긴급한 데이터 수신에 필요한 상황에서 수신측에서 요구된 시간안에 필요한 정보를 획득하기 어려운 문제가 발생한다. 그림 5는 패킷 수에 따른 종단간 전송시간을 나타내었다. 전송 패킷의 수를 초당 1개부터 10개까지 순차적으로 증가시켜가며 싱크 노드까지 전송시간을 나타내었다. BISA는 3초이하의 값을 나타내었고 MCRT와 Energy Efficient Routing은 5초이상의 값을 나타내었다. 세 알고리즘의 전송 시간 차이는 BISA에서 RTT를 이용하여 채널의 RTT가 적은 채널을 우선순위로 하여 전송시간을 최소화하였기 때문이다.

V. 결 론

센서 네트워크에서 에너지 소모의 문제는 핵심 주제로 자주 다루어지고 있다. 기존에 제시되었던 에너지 효율성 문제는 Duty cycle을 조절^[1,2]하여 수면시간을 늘려주거나 특정 라우팅 경로만을 이용^[3]하여 데이터를 전송함으로써 데이터 전송 지연이 늘어나거나 노드들의 에너지 소모를 더욱 증가시키게 되었다. 그리고 전송지연에 대한 기존연구는 과도한 제어패킷을 이용^[4,5]하거나 편향된 채널을 이용하여 데이터 패킷을 전송^[7]하는 방법들이 제시되었다. 본 논문에서는 이러한 문제점을 개선하기 위하여 BISA를 제안하였다. BISA는 에너지의 값과 노드의 흡을 이용하여 최단 라우팅 경로 설정을 통해 에너지 소모를 최소화하며 다중채널에서 RTT를 이용하여 채널의 RTT를 데이터 패킷 전송을 이용하여 구함으로써 제어패킷의 사용을 최소화하였다. 시뮬레이션을 통한 실험결과 BISA가 MCRT와 Energy Efficient Routing보다 에너지 소모와 전송 지연에 대한 결과에서 더 효율적이었음을 확인할 수 있었다. 하지만 퀄리티 높은 채널을 우선적으로 선택하여 사용함으로써 다른 노드에서 임계값을 만족시킬 수 있는 채널을 선택하고자 하였을 때 임계값 이상의 퀄리티를 갖는 채널이 모두 사용 중인 경우 데이터 전송 지연이 길어지는 문제가 발생한다.

다. 향후에는 실제 센서 망을 구현하고 센서 노드에 알고리즘을 구현하여 시스템 성능을 확인하고자 한다. 또한 채널을 좀 더 효율적으로 분배시킬 수 있는 방법이 연구되어야 할 것이다.

References

- [1] W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin, "An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks," in *Proc. 21st Ann. Joint Conf. IEEE Computer and Commun. Soc. (INFOCOM 2002)*, vol. 3, pp. 1567-1576, New York, U.S.A., June 2002.
- [2] S. H. Kim, S. K. Lee, C. R. Jung, and J. K. Koh, "Adaptive MAC protocol for low latency in WMSN," *J. Korean Soc. Internet Inform.*, vol. 10, no. 2, pp. 161-169, Apr. 2009.
- [3] S. R. Jin, W. Y. Lee, T. Y. Kim, W. H. Lee, J. S. In, and D. S. Eom, "A cost-based optimal path routing algorithm in Wireless Sensor Networks," *J. IEEK*, vol. 29, no. 2, pp. 314-317, Seoul, Korea, Nov. 2006.
- [4] M. S. Kim, S. S. Kim, K. S. Koh, G. W. Cho, and M. H. Lee, "An MAC protocol design in minimizing of data transmission delay for wireless sensor networks," *J. Korean Soc. Internet Inform.*, vol. 8, no. 2, pp.43-54, Apr. 2007.
- [5] D. Lee and K. Chung, "An energy efficient and low latency MAC protocol using RTS aggregation for wireless sensor networks," *J. KIISE*, vol. 35, no. 4, pp. 326-336, Aug. 2008.
- [6] K. Kang, B. Song, and K. Chung, "An adaptive back-off scheme to guarantee bounded delay in wireless sensor networks," *J. KCC 2009*, vol. 36, no. 1, pp. 263-266, Jeju Island, Korea, June 2009.
- [7] K. Chung and K. Chung, "A multi-channel MAC protocol based on link quality to improve transmission reliability in wireless sensor networks," *J. KIISE*, vol. 38, no. 4, pp. 282-292, Aug. 2011.
- [8] J. Han, Y. Kim, M. Lee, and B. Kim, "Reservation based multichannel CSMA protocol for improvement of energy

consumption and QoS in wireless sensor networks,” *J. KICS*, vol. 32, no. 2, pp. 143-151, Feb. 2007.

- [9] F. Dressler and O. B. Akan, “A survey on bio-inspired networking,” *Computer Networks*, vol. 54, no. 6, pp. 881-900, Apr. 2010.
- [10] M. Dorigo, M. Birattari, and T. Stutzle, “Ant colony optimization,” *IEEE Computational Intell. Mag.*, vol. 1, no. 4, pp. 28-39, Nov. 2006.
- [11] S. Kumar and C. S. P. Rao, “Application of ant colony, genetic algorithm and data mining-based techniques for scheduling,” *Robotics and Comput.-Integrated Manufacturing*, vol. 25, no. 6, pp. 901-908, Dec. 2009.
- [12] X. Wang, X. Wang, X. Fu, G. Xing, and N. Jha, “Flow-based real-time communication in multi-channel wireless sensor networks,” in *Proc. 6th European Conf. Wireless Sensor Networks*, pp. 33-52, Cork, Ireland, Feb. 2009.
- [13] N. Batra, A. Jain, and S. Dhiman, “An optimized energy efficient routing algorithm for wireless sensor network,” *Int. J. Innovative Technol. Creative Eng.*, vol. 1, no. 5, pp. 41-45, May. 2011.

손재현 (Jae-hyun Son)



2012년 2월 수원대학교 정보통신공학과 졸업
2012년 3월~현재 수원대학교 정보통신공학과 석사과정
<관심분야> 네트워크 제어, 생체모방알고리즘

손수국 (Su-goog Shon)



1982년 2월 서울대학교 전기공학과 졸업
1984년 2월 서울대학교 전기공학과 석사
1996년 2월 University of Texas at Austin, ECE Ph. D. 2003년~현재 수원대학교 IT대학정보통신공학과
<관심분야> 컴퓨터 및 임베디스 시스템, 네트워크 프로토콜, 네트워크 시뮬레이션, 네트워크 프로그래밍

변희정 (Hee-jung Byun)



1999년 2월 숭실대학교 정보통신공학과 졸업
2001년 2월 한국과학기술원 전자전산학과 석사
2005년 8월 한국과학기술원 전자전산학과 박사
2010년 삼성종합기술원, 삼성전자
2010년~현재 수원대학교 IT 대학 정보통신공학과
<관심분야> 네트워크 제어