

IEEE 802.15.4기반 무선센서네트워크에서 에너지 효율적인 데이터 병합을 위한 동적 타임아웃 스케줄링

(Dynamic Timeout Scheduling for Energy-Efficient Data Aggregation in Wireless Sensor Networks based on IEEE 802.15.4)

백 장 운 [†] 남 영 진 ^{**}
(Jang Woon Baek) (Young Jin Nam)

서 대 화 ^{***}
(Dae-Wha Seo)

요 약 본 논문에서는 IEEE 802.15.4 저속 무선개인통신망(LR-WPAN)을 기반으로 센서노드간의 홉간지연을 분석하고 이를 바탕으로 에너지 효율적이고 정확한 데이터 병합을 위한 동적 타임아웃 스케줄링을 제안한다. 제안기법은 홉간지연의 특성을 이용하여 애플리케이션이 요구하는 데이터 정확도를 만족하는 타임아웃을 무선 채널의 특성과 채널을 공유하는 노드의 수를 고려하여 결정한다. 제안 기법에서의 타임아웃은 기존의 데이터 병합 기법에서 타임아웃으로 사용했던 홉간지연의 최대값보다 훨씬 작으므로 센서노드의 메시지 대기로 인한 에너지 소모를 상당부분 줄일 수 있다. 또한, 응용애플리케이션이 요구하는 패킷의 수신률을 보장함으로써 데이터 병합의 정확도 유지할 수 있다. 시뮬레이션 결과, 동적 타임아웃 스케줄링 기법은 기존 홉간지연의 최대값을 타임아웃으로 사용하는 것 보다 에너지소모 측면에서 30%이상의 성능향상을 보였고 데이터 정확도의 성능저하는 거의 없었다.

키워드 : 무선센서네트워크, 인-네트워크 병합, 타임아웃

Abstract This paper proposes a dynamic timeout scheduling for energy efficient and accurate aggregation by analyzing the single hop delay in wireless sensor networks based on IEEE 802.15.4. The proposed scheme dynamically configures the timeout value depending on both the number of nodes sharing a channel and the type of wireless media, with considering the results of delay analysis of the single hop delay. The timeout of proposed scheme is much smaller than the maximum single hop delay which is used as the timeout of traditional data aggregation schemes. Therefore the proposed scheme considerably reduces the energy consumption of idle monitoring for waiting messages. Also, the proposed scheme maintains the data accuracy by guaranteeing the reception ratio required by the sensor network applications. Extensive simulation has revealed that proposed scheme enhances energy consumption by 30% with maintaining data accuracy, as compared with the TAG data aggregation.

Key words : Wireless Sensor Networks, in-network aggregation, timeout scheduling

1. 서론

무선센서네트워크는 센서노드의 제한된 배터리로 인해 효율적인 에너지 사용이 매우 중요하다. 센서노드의 에너지 소모는 센싱이나 프로세싱에 비해 메시지 통신에 훨씬 더 많은 에너지가 소모되고, 전체 에너지 소모의 많은 부분을 메시지 통신이 차지한다. 메시지 통신으로 인한 에너지 소모를 줄이기 위해 인-네트워크 병합이 많이 사용되고 있다[1-4].

인-네트워크 병합은 센서노드의 전송메시지 수를 줄임으로써 메시지 통신에 소모되는 전력을 줄일 수 있다. 또한, 데이터 병합은 네트워크 트래픽이 감소시켜 패킷의 충돌 빈도를 줄이므로 메시지가 전달되는데 걸리는 시간을 감소시킬 수 있다. 인-네트워크 병합을 사용하는 무선센서네트워크는 주로 트리 토폴로지를 가지고, 각 노드는 자식노드의 데이터와 로컬 센싱 데이터를 병합하여 하나의 메시지만 부모노드로 전송한다[1-4]. 인-네트워크 병합을 수행하기 위해서 센서노드는 부모노드로 메시지를 전송하기 전에 자식노드의 메시지를 기다려야

· 본 연구는 2009년도 경북대학교 BK21사업과 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학IT연구센터지원사업의 연구결과로 수행되었음(NIPA-2009-C1090-0902-0045)

· 이 논문은 2009 한국컴퓨터종합학술대회에서 'IEEE 802.15.4기반 무선센서네트워크에서 에너지 효율적인 데이터 병합을 위한 동적 타임아웃 스케줄링'의 제목으로 발표된 논문을 확장한 것임

[†] 학생회원 : 한국전자통신연구원 자동차SW플랫폼팀 선임연구원
jwbaek98@etri.re.kr

^{**} 정 회원 : 대구대학교 컴퓨터 IT 공학부 교수
yjinam@daegu.ac.kr

^{***} 종신회원 : 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 교수
dwseo@ee.knu.ac.kr

논문접수 : 2009년 8월 14일

심사완료 : 2009년 10월 12일

Copyright©2009 한국정보과학회: 개인 목적이나 교육 목적인 경우, 이 저작물의 전체 또는 일부에 대한 복사본 혹은 디지털 사본의 제작을 허가합니다. 이 때, 사본은 상업적 수단으로 사용할 수 없으며 첫 페이지에 본 문구와 출처를 반드시 명시해야 합니다. 이 외의 목적으로 복제, 배포, 출판, 전송 등 모든 유형의 사용행위를 하는 경우에 대하여는 사전에 허가를 얻고 비용을 지불해야 합니다.

정보과학회논문지: 컴퓨터의 실제 및 레터 제15권 제12호(2009.12)

한다. 이때, 병합을 수행하기 전에 자식노드로부터 메시지를 기다리는 시간을 타임아웃이라고 한다. 타임아웃이 클수록 많은 자식노드로부터 메시지를 수신할 수 있으므로 데이터 정확도는 높아지지만 전송지연이 길어지고 에너지 소모량이 증가한다[1-4]. 따라서 데이터병합의 정확도를 유지하면서 에너지 효율성을 높이는 타임아웃을 사용하는 것이 중요하다.

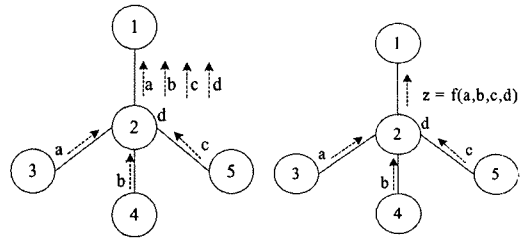
데이터 병합 동기를 맞추기 위한 타임아웃은 노드간의 홉간지연에 의해 결정된다[1-4]. 트리 토폴로지를 가지는 무선센서네트워크에서 기존의 데이터 병합은 자식노드의 메시지 수신을 보장하기 위해 홉간지연의 최대값을 타임아웃으로 사용하였다. 하지만, 실제 대부분의 자식노드의 메시지가 도착하는데 걸리는 시간은 홉간지연의 최대값보다 훨씬 작다. 따라서 홉간지연의 최대값을 타임아웃으로 사용하는 것은 과도한 메시지 대기로 인한 에너지 소모를 야기한다. 본 논문에서는 무선센서네트워크에 적합한 PHY/MAC 프로토콜인 IEEE 802.15.4 LR-WPAN(low rate wireless personal area network) [5,6]을 기반으로 하여 센서노드간의 홉간지연을 분석하고, 그 결과를 이용하여 데이터 병합 시 정확도를 높이면서 에너지 효율적인 데이터 병합을 위한 동적 타임아웃 스케줄링을 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 인-네트워크 병합 및 IEEE 802.15.4에 대하여 살펴본다. 3장에서는 IEEE 802.15.4 기반으로 센서노드 사이의 홉간지연을 분석하고 네트워크 환경과 응용애플리케이션의 요구사항을 고려한 동적 타임아웃 스케줄링 기법을 제시한다. 4장에서는 실험을 통하여 제안한 기법의 성능을 검증한다. 5장에서 결론을 맺고 향후 과제를 제시한다.

2. 배경

2.1 인-네트워크 병합

그림 1은 인-네트워크 병합의 예를 보여준다. 그림 1(a)에서 노드 2가 병합을 수행하지 않을 경우에는 4개의 메시지(a, b, c, d)를 전송해야 한다. 하지만, 그림 1(b)에서 노드 2는 자식노드로부터 받은 데이터 a, b, c와 자신이 수집한 데이터 d를 함수 f로 병합한 z값을 가지는 한 개의 메시지(z)만 전송하면 된다. 이때, 노드 2는 데이터병합 전에 타임아웃동안 자식노드의 메시지(a, b, c)를 기다린다. 기존의 데이터 병합기법에서 센서노드는 자식노드의 메시지 수신을 보장하기 위해 홉간지연의 최대값(SHD_{max})동안 메시지를 기다린다[1-4]. 하지만, 실제 홉간지연의 대부분은 SHD_{max} 값 보다 훨씬 작으므로 타임아웃을 항상 SHD_{max} 로 유지하는 것은 불필요한 에너지 소모를 야기할 수 있다.



(a) 인-네트워크 병합 없음 (b) 인-네트워크 병합
그림 1 인-네트워크 병합 예

2.2 IEEE 802.15.4

IEEE 802.15.4 LR-WPAN은 저비용, 저속도 유비쿼터스 통신에 중점을 둔 PHY/MAC 네트워크 계층으로 저전력을 요구하는 무선센서네트워크 응용에 적합하다[5].

IEEE 802.15.4 네트워크는 표 1에서와 같이 ISM 주파수 대역에 정의된 3개의 주파수 대역에서 동작한다. 본 논문에서는 다른 주파수 대역에 비해 대규모 센서네트워크에 적합한 2.4GHz 대역을 중심으로 분석한다.

IEEE 802.15.4 MAC 프로토콜은 비콘-활성모드(beacon-enabled mode)와 비콘-비활성모드(non-beacon mode)에서 동작한다. 비콘-비활성모드에서는 간단한 CSMA/CA 방식이 사용된다. 노드가 데이터를 전송할 때, 노드는 임의의 백오프 기간 동안 기다린다. 그리고 전송매체가 미사용(idle) 상태인지 확인하고, 미사용 상태이면 데이터를 전송하고, 그렇지 않으면 다시 백오프 과정을 반복한다. 비콘-활성모드는 그림 2와 같은 슈퍼프레임 구조를 가진다. 슈퍼프레임은 코디네이터라고 명명된 노드에 의해서 전송되는 비콘으로 시작한다. 슈퍼프레임은 활동(active) 구간과 비활동(inactive) 구간으로 나누어진다. 비활동 구간 동안에 노드는 저전력 모드로 들어가고, 노드간의 통신은 활동 구간에서만 이루어진다. 활동 구간은 동일한 크기의 16개의 슬롯으로 나누어지고 경쟁접근기간(contention access period, CAP)과 무경합기간(contention free period, CFP)로 구성된다. CFP는 QoS를 가지는 데이터를 위한 것으로 보장타임슬롯(guaranteed time slot, GTS)으로 불린다. CAP에서 채널 접속은 CSMA/CA를 사용한다. 비콘 주기(beacon interval, BI)와 슈퍼프레임 기간(superframe duration, SD)는 비콘차수(beacon order, BO)와 슈퍼프

표 1 IEEE 802.15.4 물리 변수

Frequency band (MHz)	Symbol rate (ks/s)	Modulation	Bit rate (kb/s)
868-868.6	20	BPSK	20
902-928	40	BPSK	40
2.4-2.4835	62.5	O-QPSK	250

레임 차순(superframe order, SO)으로 조절할 수 있다. 관계식은 다음과 같다.

$$BI = aBaseSuperframeDuration * 2^{BO},$$

$$SD = aBaseSuperframeDuration * 2^{SO},$$

$$0 \leq SO \leq BO \leq 14.$$

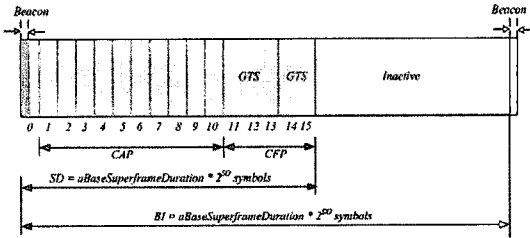


그림 2 IEEE 802.15.4 슈퍼프레임 구조

3. 동적 타임아웃 스케줄링

본 절에서는 IEEE 802.15.4 LR-WPAN을 기반으로 하여 센서노드간의 홉간지연을 분석하고 응용 애플리케이션이 요구하는 데이터 정확도를 보장하기 위한 데이터 병합 타임아웃을 결정하는 방법을 제시한다.

IEEE 802.15.4에서 CAP 동안 다중 동시 전송 발생 시 충돌을 회피하기 위해 각 노드는 CSMA/CA 프로토콜을 사용한다. 각 노드는 패킷 전송 시도를 위해 세 개의 변수(NB , BE , CW)를 관리한다. NB 는 CSMA/CA 백오프 시도 횟수이다. NB 의 초기값은 0이고 0과 5사이의 값이 될 수 있다. BE 는 빈 채널 평가(clear channel assessment, CCA) 전에 노드가 기다려야 하는 백오프 기간을 정의하는 백오프 지수이다. BE 의 초기값은 3이고 0과 5사이의 범위를 가진다. CCA 후에 채널이 사용중(busy)이면 NB 와 BE 는 1씩 증가한다. BE 는 5를 넘을 수 없고, 반복 횟수는 NB 의 최대값인 5로 제한된다. CW 은 전송하기 전에 채널 클리어에 필요한 시간인 충돌 윈도우 길이이고 초기값은 2이다.

IEEE 802.15.4 표준에 의하면 백오프 주기는 2.4GHz 주파수 대역을 기준으로 320us(20 symbols)이고, 백오프주기의 수는 $[1, 2^{BE}-1]$ 범위에서 랜덤하게 선택된다. 백오프기간(T_{BO})은 백오프주기(320us)와 백오프주기의 수의 곱이다. CCA에 걸리는 시간(T_{CCA})은 128us (8 symbols)를 넘지 않는다.

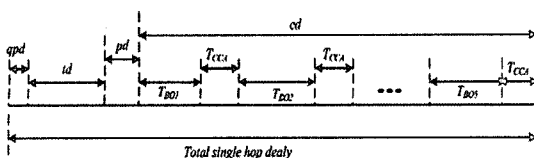


그림 3 CSMA/CA 기반 홉간지연 계산

홉간지연은 그림 3과 같이 큐잉 및 처리지연(qpd), 전송지연(td), 전파지연(pd), 채널충돌지연(cd)으로 구성되고, 아래 식과 같다[3,6].

$$shd = qpd + td + pd + cd \quad (1)$$

그리고 패킷이 도착하면 큐에서 대기 없이 병합되고 처리지연은 매우 작기 때문에 큐잉 및 처리지연은 거의 무시할 수 있다[3]. 센서노드 프로세서의 처리량이 수 MIPS이므로 몇 개의 명령어를 수행하는데 걸리는 시간은 수 us 밖에 되지 않는다. IEEE 802.15.4의 2.4GHz 주파수대역에서 전송속도(bit rate)는 250kbps 이다. 70bytes 크기의 패킷을 전송하는데 걸리는 전송지연(td)은 2.24ms이다. 자유공간에서 전파속도는 3×10^8 m/s이므로 노드간 거리가 9m이면 전파지연(pd)은 0.03us 밖에 되지 않으므로 무시할 수 있다. 채널충돌지연은 트래픽, 주변노드의 수 등의 네트워크 환경에 따라 달라진다. 채널충돌지연을 식 (2)와 같이 계산할 수 있다[6].

$$cd = RT_{CCA} + f(R, T_{BO(a)}) \quad (2)$$

식 (2)에서 R 은 백오프 횟수, T_{CCA} 는 CCA 시간, $T_{BO(a)}$ 는 각 백오프에 대한 백오프 기간이고 $f(R, T_{BO(a)})$ 는 전체 백오프에 대한 백오프기간의 합이다. 예를 들어, 백오프를 두 번하면, 채널충돌지연 $cd = 2T_{CCA} + T_{BO1} + T_{BO2}$ 이다. 그리고 백오프횟수(R)는 NB 최대값인 5를 넘을 수 없으므로, 최악의 경우의 채널충돌지연은

$$cd_{max} = 5T_{CCA} + \sum_{i=1}^5 Max(T_{BO(i)}) \text{이다.}$$

따라서 홉간지연의 최대값은

$$SHD_{max} = Max(qpd + td + pd) + cd_{max} \text{이다.}$$

본 논문에서는 홉간지연의 최대값을 타임아웃으로 사용할 경우에 발생하는 불필요한 에너지 소모를 줄이기 위해 네트워크 환경에 따라 동적으로 타임아웃 조절한다. 응용 애플리케이션이 자신의 데이터 정확도를 만족하기 위해 자식노드의 $a\%$ 가 데이터병합에 포함되는 것을 요구한다고 가정할 때, 동적타임아웃의 유도 과정은 다음과 같다. 네트워크 내에 전송채널을 공유하는 노드가 n 개이고, 임의의 한 노드가 패킷을 전송하려고 할 때 다른 노드가 CCA 후에 패킷을 전송하고 있을 확률이 q 이면 백오프기간 후에 CCA 결과 채널이 비어있을 확률은 $(1-q)^{n-1}$ 이다. 이때, q 는 전체 전송 구간 대비 패킷 전송에 걸리는 시간의 비이다. x 번의 백오프 후에 패킷 전송 확률은 $p(1-p)^{x-1}$ 이고, 전체 $\{1-(1-p)^x\} * n$ 개의 노드가 x 번의 백오프 후에 전송된다. n 개의 노드 중에서 $a\%$ 의 노드가 전송될 때의 백오프 횟수 x' 은 $\log(1-a)/\log(1-p)$ 이므로 채널충돌지연

$$cd_a = x' * T_{CCA} + f(x, T_{BO(a)}) \text{이고}$$

$a\%$ 의 자식노드를 수신하기 위한 홉간지연은

$$SHD_a = Max(qpd + td + pd) + cd_a \text{이다.}$$

Algorithm 1 Dynamic timeout aggregation

```

for each  $node_i$  in the network do
   $hopCount_i = hopCount_{parent} + 1$ ;
   $Timeout_i = SHD_a$ 
   $start\_timeout_i = CT + SHD_a(N - hopCount_i)$ ;
  //CT: collection starting time from leaf node
  //N: hop counts of leaf node, depth of tree
  start TIMER with  $T_{cur}=0$  at  $start\_timeout_i$ ;
  while(1)
     $data_i \leftarrow$  sensing value at  $node_i$ ;
    while  $T_{cur} = Timeout_i$  do
      if(received every  $data_{child(i)}$ ) goto L1;
      else receive  $data_{child(i)}$  from  $node_{child(i)}$ ;
    repeat
    L1: $data_i \leftarrow aggregate(data_{child(i)}, data_i)$ ;
      send  $data_i$  to  $node_{parent(i)}$ ;
      sleep during T
    repeat
  
```

알고리즘 1은 동적 타임아웃을 사용하는 데이터병합의 동작을 보여준다. 동적 타임아웃 병합 기법은 각 센서노드($node_i$) 상에서 동작한다. 각 센서노드($node_i$)는 자신의 홵수($hopCount_i$), 타임아웃($Timeout_i$), 그리고 메시지 수신 시작시간($start_timeout_i$) 초기화한다. 메시지 수신 시작은 리프 노드가 전송을 시작한 시점으로부터 SHD_a 와 리프 노드간의 홵수를 곱한 시간 뒤에 시작하면 된다. 그리고 이와 동시에 타임아웃 타이머(T_{cur})를 구동하고, 자식노드들로부터 메시지를 기다린다. 센서노드는 SHD_a 내에 모든 자식노드의 메시지를 수신하거나 타임아웃을 초과하면 병합을 수행하고 부모노드로 메시지를 전송한다. 그리고 다음 데이터 병합 주기(T)까지 슬립한 후에 다시 데이터 병합을 시작한다.

4. 성능평가

본 논문에서는 NS-2 네트워크 시뮬레이터를 이용하여 성능평가를 수행하였다[7]. 센서네트워크는 트리 토폴로지 형태로 7m 간격으로 노드를 배치하였고, 라디오 전파범위는 9m로 설정하였다. PHY/ MAC프로토콜은 IEEE 802.15.4를 사용하였고, 패킷 사이즈는 70bytes로 정하였다. 노드의 송신전력은 43.2mW, 수신전력은 33mW 그리고 슬립전력은 0.003mW로 설정하였다.

4.1 홵간지연 실험

그림 4는 100개의 센서노드가 싱크노드(BS)로 1초마다 주기적으로 패킷을 전송할 때, 홵간지연의 분포를 보여준다. 그림 4에서 전체 전송 패킷의 90% 이상이 13.2ms 이내에 도착함을 볼 수 있다. $100 \times 100m^2$ 에 100개의 노드에 배포되었을 때, 3개의 센서노드가 채널을 공유하므로 3장의 식 (3)을 이용하여 90%이상의 패킷이 도착할 때의 홵간지연을 구하면 약 14.5ms가 나온다. 그리고 실험에서 홵간지연의 최대값은 36ms 이었고, 이것은 수

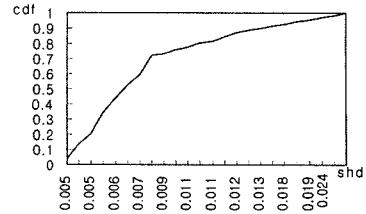


그림 4 홵간지연 분포: d=100, f=1sec.

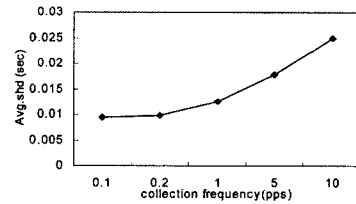


그림 5 수집빈도에 따른 홵간지연: d=100

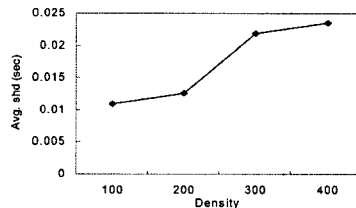


그림 6 밀도에 따른 홵간지연: f=1sec

학적으로 분석한 값 39ms와 비슷하다. 수학적 분석과 실험을 통해 센서노드가 전송한 패킷은 최대 홵간지연보다 훨씬 이전에 도착함을 알 수 있다.

그림 5는 데이터 수집 빈도(f)에 따른 평균홵간지연을 나타낸 것이다. 그림 5에서 데이터 수집 빈도가 증가할수록 홵간지연이 증가함을 알 수 있다. 데이터 수집 빈도가 증가하면 센서 네트워크 내의 트래픽이 증가하여 혼잡(congestion)이 가중되어 홵간지연이 증가한다. 따라서 IEEE 802.15.4 기반의 센서 네트워크에서 데이터 수집 빈도를 1pps(packet per second)이상으로 설정하면 전송지연의 성능이 급속히 떨어진다.

그림 6은 채널을 공유하는 네트워크 밀도(d)에 따른 평균홵간지연을 나타낸 것이다. 네트워크 밀도가 증가할수록 무선채널을 공유하는 노드의 수가 증가하고 채널에 접근하는 노드가 많아지므로 충돌로 인한 백오프 횟수가 증가하여 홵간지연이 증가한다.

4.2 타임아웃 성능평가

제안 기법과 기존 데이터병합(TAG[4])의 성능을 에너지 효율성 및 데이터 정확도 측면에서 비교하였다. 이때, 제안기법의 데이터 수신률(α)는 90%, 수집 빈도(f)는 1초로 설정하였다.

그림 7에서 홉간지연의 최대값을 타임아웃으로 사용하는 것 보다 동적 타임아웃을 사용하는 것이 센서노드의 에너지소모를 훨씬 많이 줄일 수 있음을 알 수 있다. IEEE 802.15.4 네트워크에서 홉간지연의 최대값은 39ms이지만 네트워크 밀도가 0.01nodes/m²이고 응용애플리케이션이 요구하는 수신데이터 비율 $\alpha = 90\%$ 일 때의 동적 타임아웃은 약 13ms이다. 따라서 동적 타임아웃 기법은 타임아웃 기간을 줄임으로써 메시지 대기로 인해 소모되는 전력을 줄일 수 있다. 그리고 그림 7에서 밀도가 증가할수록 제안기법의 에너지 소모가 증가함을 볼 수 있다. 이는 밀도가 증가할수록 패킷 수신률을 만족하기 위한 제안기법의 동적 타임아웃이 증가하기 때문이다.

그림 8은 네트워크 밀도에 따른 수집데이터의 정확도를 비교한 것이다. 정확도는 실제 결과 값 대비 병합 결과의 평균제곱근 에러 평균 RMS(root mean square) 에러를 이용하였다. 그림 8에서 기존 홉간지연의 최대값을 타임아웃으로 사용하는 경우와 비교해서 동적 타임아웃을 사용하는 데이터 병합의 데이터 정확도는 거의 차이가 없음을 알 수 있다. 보통의 경우 동일지역에 배포된 각 센서노드에서 수집되는 데이터 값은 유사하기 때문에 모든 자식노드의 데이터를 수신하지 않아도 정확도 측면에서 성능의 저하가 거의 없다.

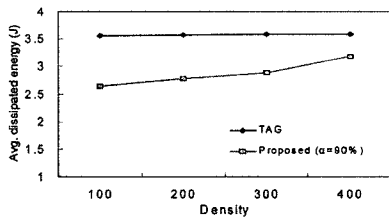


그림 7 밀도에 따른 평균소모에너지: $\alpha=90\%$, $f=1\text{sec}$.

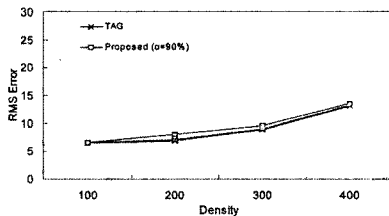


그림 8 밀도에 따른 데이터 정확도: $\alpha=90\%$, $f=1\text{sec}$.

5. 결론

본 논문에서는 무선 센서 네트워크에 적합한 PHY/MAC 프로토콜인 IEEE 802.15.4 저속 무선개인통신망을 기반으로 홉간지연을 분석하여 정확도가 높고 에너지 효율적인 데이터 병합을 위한 동적 타임아웃 스케줄링

기법을 제안하였다. 제안기법은 홉간지연의 분석 결과를 바탕으로 응용 애플리케이션이 요구하는 데이터 수신률과 무선 채널의 특성 및 채널을 공유하는 노드의 수에 따라 동적으로 타임아웃을 결정한다. 제안 기법의 타임아웃은 기존의 홉간지연의 최대값을 사용하는 타임아웃보다 훨씬 작으므로 센서노드의 메시지 대기로 인한 에너지 소모를 상당부분 줄일 수 있다. 또한, 응용애플리케이션이 요구하는 패킷을 수신률을 보장하면서 병합을 수행하므로 정확도의 성능저하는 크지 않다. 시뮬레이션 결과 기존 홉간지연의 최대값을 타임아웃으로 사용하는 것 보다 에너지소모 측면에서 30%이상의 성능향상을 보였고 데이터 정확도의 성능저하는 거의 없었다. 향후 과제에서는 센서노드의 고장에 대응하여 데이터병합을 수행할 수 있도록 제안기법을 향상시키는 연구를 수행할 것이다.

참고 문헌

- [1] S. Madden, R. Szewczyk, M. Franklin and D. Cullera, "Supporting Aggregate Queries Over Ad-Hoc Wireless Sensor Networks," *Proc. of the IEEE Workshop on Mobile Computing and Systems Applications*, 2002.
- [2] I. Solis and K. Obraczka, "In-Network Aggregation Trade-offs for Data Collection in Wireless Sensor Networks," *International Journal of Sensor Networks*, 2006.
- [3] S. Madden, M. Franklin, J. Hellerstein, and W. Hong, "TAG: a Tiny Aggregation Services for Ad-Hoc Sensor Networks," *Proc. of the Symposium on Operating Systems Design and Implementation*, Dec. 2002.
- [4] W. Yuan, S. Krishnamurthy, and S. Tripathi, "Synchronization of Multiple Levels of Data Fusion in Wireless Sensor Networks," *Proc. of the IEEE Global Communications Conference*, 2003.
- [5] M. Kohvakka, M. Kuorilehto, M. Hännikäinen, and T. Hämäläinen, "Performance Analysis of IEEE 802.15.4 and ZigBee for Large-scale Wireless Sensor Network Applications," *Proc. of the 3rd ACM International Workshop on Performance Evaluation of Wireless Ad Hoc, Sensor and Ubiquitous Network*, pp.48-57, 2006.
- [6] N. Timmons and W. Scanlon, "Analysis of the Performance of IEEE 802.15.4 for Medical Sensor Body Area Networking," *Proc. of the First Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks*, pp.16-24, Oct. 2004.
- [7] VINT, "The Network Simulator NS-2," <http://www.isi.edu/nsnam>, Nov. 2005.