

사물인터넷 환경에서 에너지 소모량을 줄이기 위한 네트워크 부호화 기반 정보 공유 방식

김정현*, 박다빈*, 송홍엽°

Network Coding-Based Information Sharing Strategy for Reducing Energy Consumption in IoT Environments

Jung-Hyun Kim*, Dabin Park*, Hong-Yeop Song°

요 약

본 논문에서는 사물인터넷 환경에서 통신 기기들이 정보를 직접 공유하고자 할 때 전체 네트워크의 에너지 소모량을 최소화하기 위한 방식을 제안한다. 제안하는 방식은 매 전송 시 동적으로 전송 노드 및 전송 데이터를 선택하는 효과적인 네트워크 부호화 기법을 사용하여 정보 공유에 필요한 총 전송 횟수를 감소시킨다. 실험을 통하여 기존의 고정된 순서로 전송 노드를 설정하는 네트워크 부호화 방식, 랜덤한 순서로 전송 노드를 설정하는 네트워크 부호화 방식, 그리고 랜덤한 순서로 전송 노드를 설정하는 비부호화 방식에 비해 총 전송 횟수 측면에서 보다 뛰어난 성능을 가짐을 확인하였다.

Key Words : Internet-of-Things, Network Coding, Energy Consumption, Information Sharing, Sensor Network

ABSTRACT

This paper proposes a method of minimizing total energy consumption of IoT environment when communication devices in the network share the information directly. The proposed method reduces total number of transmission for the information sharing by using an effective network coding-based technique which dynamically selects a node and a data packet for each transmission. Simulation results show that the proposed method has better performance than an existing network coding-based method selecting transmission node in fixed order, a network coding-based method selecting transmission node in random order, and a uncoded method selecting transmission node in random order.

I. 서 론

사물인터넷(IoT, Internet of Things) 환경에서는 수많은 통신 기기들이 유무선 접속망을 통해 서로 연결되어 스마트 홈(smart home), 재해 감시 서비스, U-헬

스케어(Ubiquitous-healthcare), 인텔리전트 빌딩 시스템(IBS, Intelligent Building System) 등 다양한 서비스를 제공한다^{1,2)}. 이러한 네트워크에서는 망 관리 정보를 지속적으로 모든 기기들에게 전달해야만 한다. 또한 모든 노드가 백본망과 직접 연결이 불가능한 무

* This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Education(No. 2013R1A1A2062061).

◆ First Author : School of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University, jh.kim06@yonsei.ac.kr, 학생회원

° Corresponding Author : School of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University, hysong@yonsei.ac.kr, 종신회원

* School of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University, db.park@yonsei.ac.kr, 학생회원

논문번호 : KICS2015-12-404, Received December 23, 2015; Revised March 14, 2016; Accepted March 28, 2016

선 센서 네트워크의 경우 백본과 직접 연결된 허브 노드 주변의 상위 노드들은 많은 양의 데이터 전송으로 인해 수명이 빨리 소모된다. 이런 경우 하위 노드들의 배터리는 충분함에도 불구하고 전체 네트워크가 기능을 상실하게 된다. 이러한 에너지 홀 문제(energy hole problem)^[2]가 발생하는 것을 최소화하기 위해서는 상위 노드의 데이터 전송을 최소화하고 하위 노드들 간의 균등한 에너지 소모를 가능하게 하는 효율적인 데이터 전송이 필요하다. 사물인터넷 환경에서 주로 고려되는 무선 센서 네트워크에서 효율적인 전송을 위한 기존의 연구로 실시간 데이터 전송을 위한 라우팅 프로토콜에 대한 연구^[3], 중계 함수의 파라미터를 조절하여 목표 수신 확률을 만족하면서 총 에너지 소모를 줄이는 연구^[4], 선형(line) 네트워크 토폴로지에서 네트워크 부호화 기반 정보 공유에 대한 연구^[5] 등이 있다.

네트워크 부호화 기법은 네트워크 상의 노드들이 다양한 경로로 정보를 전달할 때 부호화를 통해 효율적으로 정보를 전달하는 기법이다^[6]. 네트워크 부호화 기법이 소개된 이후 지금까지 주로 브로드캐스트(broadcast) 환경에서 네트워크 부호 기반 효과적인 재전송에 대한 연구^[7-11], 네트워크 상의 노드들이 네트워크 부호화를 통해 서로 정보를 효과적으로 교환하는 연구^[12,13], 그리고 네트워크 부호화 기법을 사용한 시스템의 에너지 소모에 관한 연구^[14,15] 등이 활발히 이루어지고 있다.

본 논문은 특별히 [5]에서 고려한 네트워크 부호화 기반 정보 공유 방식을 더욱 일반적인 네트워크 토폴로지에서 고려한다. 본 논문에서 가정하는 시스템 모델은 기존의 재전송을 고려한 브로드캐스트 환경이나 노드들 간의 정보 교환 환경과는 달리 최초 네트워크 상의 일부 노드만이 소스노드로부터 정보를 전달 받는다. 또한 사물인터넷과 같은 많은 무선 센서기기로 구성되는 네트워크에서는 기기들 간의 균등한 에너지 소모가 중요하다. 따라서 최초 정보를 전달 받은 노드로부터 모든 노드가 정보를 효과적으로 전달받기 위하여 어떠한 노드가 어떠한 데이터를 우선적으로 전송할지에 대한 연구가 추가적으로 필요하다. 본 논문에서는 위 문제를 해결하기 위하여 각 노드의 데이터 보유 상황과 이웃노드 및 전체 노드의 데이터 보유 상황을 고려하여 동적으로 우선순위를 정하여 데이터를 전송하는 기법을 제안한다. 이 과정에서 네트워크 부호화를 통해 총 전송 횟수를 최소화하여 총 에너지 소모량을 줄이고, 또한 노드들 간 최대한 균등하게 에너지가 소모되도록 전송 노드를 선택한다.

본 논문의 구조는 다음과 같다. II장에서는 시스템

모델 및 관련 연구를 소개한다. III장에서는 새로운 네트워크 부호화 기반 정보 공유 방식을 제안한다. IV장에서 실험결과를 보이고 V장에서 결론으로 논문을 마친다.

II. 관련 연구

2.1 시스템 모델

본 논문에서는 소스노드, 싱크노드, 센서노드, 대표 센서노드로 구성되는 계층적 네트워크를 고려한다. 특히 최상위의 소스노드로부터 최하위의 센서노드까지 정보를 전달하는 과정에서 각 싱크노드는 주변의 모든 센서노드에게 정보를 전달하는 것이 아닌 대표 센서노드에게만 정보를 전달하고 센서노드들은 직접 통신을 통하여 정보를 공유하게 된다. 이는 싱크노드의 부하를 줄이고 센서노드 간의 1-홉 통신을 통해 정보를 공유함으로써 에너지 효율을 높이기 위함이다. 또한 센서노드의 균일한 배터리 소모를 위하여 최초 센서노드가 데이터를 전송한 후 모든 센서노드에게 한번씩 전송 기회가 주어진 후에 다시 최초 전송 센서노드가 다시 전송의 기회를 얻는다. 이를 통해 간섭의 영향을 최소화하고 불필요한 전송으로 인한 전력소모를 줄인다. [14]에서는 노드별 전력 소모 함수를 전송 횟수와 전송 파워의 곱으로 정의하였다. 따라서 거리에 따른 전송 파워 조절을 하지 않는 단순한 센서노드의 경우 전송 횟수가 전력 소모를 나타내는 지표가 된다. 본 논문에서는 이러한 단순 센서노드로 구성된 시스템에서 전력 소모를 최소화하기 위해 전송 횟수를 최소화하는 기법에 대해 다룬다.

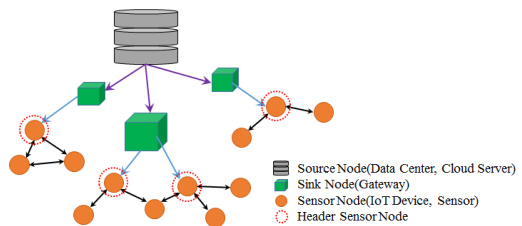


그림 1. 계층적 구조를 갖는 사물인터넷 네트워크의 예.
Fig. 1. An example of IoT network with hierarchical structure.

2.2 대표 센서노드 선출

[5]에 의하면 위와 같은 시스템 모델에서 싱크노드에 근접한 두 개의 센서노드를 대표 센서노드로 선정하는 것을 가정하고, 특별히 대표 센서노드가 선형 네트워크 토폴로지의 양 끝에 위치하는 상황에서 성능을 보였다. 본 논문에서는 M 개의 센서노드로 구성된

일반적인 네트워크 토폴로지에서 $K(1 \leq K \leq M)$ 개의 센서노드가 랜덤하게 대표 센서노드로 선출된다고 가정하였다. 이때, 싱크노드는 각 대표 센서노드에게 전체 정보를 모두 전달해주거나 일부 정보를 전달해 줄 수 있다. 단, 대표 센서노드들이 수신한 정보의 합집합이 싱크노드가 전달하고자하는 전체 정보와 같아야 한다. 본 논문에서는 특별히 싱크노드가 각 대표 센서노드에게 가능한 균등하게 정보를 나누어 전달하는 상황을 고려한다. 예를 들어, i 번째 대표 센서노드가 싱크노드로부터 전달받는 데이터 패킷 집합은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\left\{ d_j \mid j = i \cdot \left\lfloor \frac{P}{K} \right\rfloor, \dots, \min\left((i+1) \cdot \left\lfloor \frac{P}{K} \right\rfloor, P\right) \right\}, \quad (1)$$

여기서 P 는 전체 데이터 패킷의 수, d_j 는 j 번째 데이터 패킷을 나타낸다.

2.3 네트워크 부호화 기반 정보 공유

네트워크 부호화 기반 정보 공유에서는 크게 두 가지를 고려해야 한다. 첫 번째는 어떤 노드가 먼저 전송할 것인지 이고, 두 번째는 어떠한 데이터를 먼저 전송할 것인지 이다. [5]에서는 선형 네트워크 토폴로지에서 대표 센서노드로부터 가까운 순서대로 센서노드를 선택하고, 이때 선택된 센서노드가 보유한 데이터 패킷에 대해 임의로 네트워크 부호화 또는 비부호화를 적용하여 데이터 패킷을 전송하는 방식을 제안했다.

그림 2에서는 이러한 고정된 순서로 전송하는 방식을 일반적인 네트워크 토폴로지에 적용하여 부호화하지 않은 경우와 네트워크 부호화를 적용한 경우에 대해 각각 Fixed UC-TX와 Fixed NC-TX로 표시했다. 이에 반해, 임의의 센서노드를 선택하여 전송할 것이 있으면 전송하는 방식을 마찬가지로 부호화하지 않은 경우와 네트워크 부호화를 적용한 경우에 대해 각각 Rand. UC-TX와 Rand. NC-TX로 표시했다. 실험 결과는 임의의 네트워크 토폴로지에서 센서노드가 고정된 순서로 전송하는 것은 랜덤한 순서로 전송하는 것보다 정보 공유를 위해 더 많은 총 전송 횟수를 요구함을 보여준다. 특히 센서노드 수가 증가할수록 그 차이는 커진다. 이를 통해 총 전송 횟수 측면에서 기존의 고정된 순서로 전송하는 방식보다 더 나은 전송 방식이 존재함을 예상할 수 있다.

첫 번째 고려사항에 대해 [5]에서 제안한 대표 센서노드에 인접한 순서대로 전송하는 방식은 일반적인 네트워크 토폴로지에서는 특정 노드로부터 직접 데이

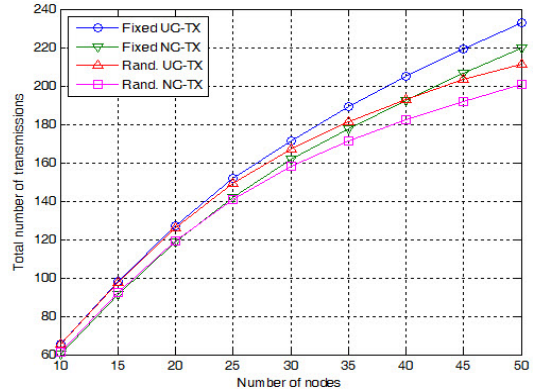


그림 2. 고정된 순서의 비부호화 전송 방식, 고정된 순서의 네트워크 부호화 전송 방식, 랜덤한 순서의 비부호화 전송 방식, 랜덤한 순서의 네트워크 부호화 전송 방식 간의 센서노드 수 대비 총 전송 횟수 비교 (데이터 패킷 수: 12개, 대표 센서노드 수: 3개, 수신 실패 확률: 0).

Fig. 2. Total number of transmissions versus the number of sensor nodes for uncoded transmission in fixed order, network coding-based transmission in fixed order, uncoded transmission method in random order, and network coding-based transmission in random order (The number of data packets: 12, the number of heads: 3, the probability of reception failure: 0).

터 전송이 가능한 이웃노드가 여러 개 존재하므로 선택의 가능성이 유일하지 않다. 뿐만 아니라 전송 오류가 존재할 경우 싱크노드로부터 전달된 정보가 대표 센서노드에서 가까운 순서대로 순차적으로 전달되지 않을 수 있다. 따라서 보다 효율적인 전송 노드 선택 방식이 요구된다. 두 번째 고려사항에 대해 [5]에서는 어떠한 정보를 우선적으로 네트워크 부호화를 적용하여 전송할 것인지에 대해 고려되지 않았다. 또한 네트워크 부호화가 가능한 정보와 네트워크 부호화가 가능하지 않은 정보가 모두 존재할 경우 어떠한 정보를 먼저 전송하는 것이 효율적인지에 대해 고려되지 않았다. 따라서 본 논문에서는 보다 효율적인 정보 공유를 위하여 위의 두 사항을 모두 고려한 새로운 전송 방식을 제안한다.

III. 제안하는 네트워크 부호화 기반 정보 공유 방식

앞 장의 관찰들을 통해 본 장에서는 새로운 네트워크 부호화 기반 정보 공유 방식을 제안한다. 제안하는 방식은 일반적인 네트워크 토폴로지에 적용할 수 있을 뿐만 아니라 전송 오류가 존재하는 환경에서도 효율적으로 정보 공유를 가능케 한다.

제안하는 네트워크 부호화 기반 정보 공유 방식은

크게 세 가지 알고리즘으로 설명할 수 있다. 본 논문에서는 이를 각각 *TRANSMISSION*, *PRIORITY*, *SELECTION*으로 정의한다. *TRANSMISSION*에서는 모든 센서노드에 대해 전송 가능 상태로 초기화하고 모든 센서노드가 공유하고자 하는 모든 데이터 패킷을 수신할 때 까지 데이터 패킷 전송을 수행한다. 이때, 우선적으로 전송을 수행할 후보 센서노드 집합을 *PRIORITY*에서 구하고 이 집합이 공집합이 아니면 해당 집합 내에서 *SELECTION*을 수행하고 공집합일 경우 모든 센서노드 집합 내에서 *SELECTION*을 수행한다.

*PRIORITY*는 우선적으로 전송을 수행할 후보 센서노드 집합을 구하는 알고리즘이다. 각 전송 가능한 노드가 보유하고 있는 모든 데이터 패킷에 대해 각 데이터 패킷을 보유하고 있지 않은 센서노드의 수를 구하여 더한다. 이 값이 가장 큰 전송 가능한 노드를 전송 후보 센서노드 집합에 포함시킨다.

*SELECTION*은 실제 전송을 수행할 센서노드와 전송할 데이터 패킷을 정하는 알고리즘이다. 각 전송 후보 센서노드가 보유하고 있는 모든 두 개의 데이터 패킷 조합 또는 모든 단일 데이터 패킷에 대해 전송 시 수신 가능한 이웃노드 수를 비교하여 그 값이 가장 큰 전송 후보 센서노드와 해당 단일 데이터 패킷 또는 데이터 패킷 쌍을 선택한다. 이때 데이터 패킷 쌍을 선택하는 경우는 네트워크 부호화가 가능한 경우이고 단일 데이터 패킷을 선택하는 경우는 비부호화 전송의 경우이다. 네트워크 부호화를 통해 전송한 경우의 수신 가능한 이웃노드 수가 최대가 되면 해당되는 두 개의 데이터 패킷을 비트 단위로 이진 덧셈(\oplus) 연산하여 전송할 네트워크 부호화 데이터 패킷을 생성한다.

알고리즘 1. Procedure of TRANSMISSION

```

for  $\forall N_i \in \mathbf{N}$ 
  Set  $Flag_{TX}(N_i) = 0$ 
while  $\sum_i |\mathbf{H}(N_i)| < MP$  where  $M = |\mathbf{M}|, P = |\mathbf{D}|$ 
   $\mathbf{S}_{max} = PRIORITY$ ;
  if  $|\mathbf{S}_{max}| \neq \emptyset$ 
     $\{N_{TX}, d_{TX}\} = SELECTION(\mathbf{S}_{max})$ ;
  else
     $\{N_{TX}, d_{TX}\} = SELECTION(\mathbf{N})$ ;
  if there is no node to transmit
    for  $\forall N_i \in \mathbf{N}$ 
      Set  $Flag_{TX}(N_i) = 0$ 
    else
       $N_{TX}$  transmits  $d_{TX}$ ;
      Set  $Flag_{TX}(N_{TX}) = 1$ ;
  
```

알고리즘 1은 앞서 설명한 *TRANSMISSION*의 과정을 보여준다. 여기서 \mathbf{N} 은 전체 센서노드 집합이고 \mathbf{D} 는 전체 데이터 패킷 집합이다. 모든 \mathbf{N} 의 원소 N_i 에 대해 $Flag_{TX}(N_i)$ 값이 0일 때 센서노드 N_i 가 전송 가능함을 나타내고 값이 1일 때 전송 불가능함을 나타낸다. $\mathbf{H}(N_i)$ 는 N_i 가 보유한 데이터 패킷 집합이다. N_{TX} 와 d_{TX} 는 각각 전송할 노드와 전송할 데이터 패킷을 나타낸다.

알고리즘 2. Procedure of PRIORITY

```

for  $\forall N_i \in \mathbf{N}$  and  $Flag_{TX}(N_i) = 0$ 
   $C_{TX}(N_i) = 0$ ;
  for  $d_j \in \mathbf{H}(N_i)$ 
    for  $\forall N_k \in \mathbf{N} \setminus N_i$ 
      if  $d_j \in \mathbf{W}(N_k)$ 
         $C_{TX}(N_i) = C_{TX}(N_i) + 1$ ;
  set  $\mathbf{S}_{max} = \emptyset$ ;
  if  $\max C_{TX}(N_i) > 0$  for  $\forall N_i \in \mathbf{N}$  and  $Flag_{TX}(N_i) = 0$ 
    for  $\forall N_i \in \mathbf{N}$  and  $Flag_{TX}(N_i) = 0$ 
       $\mathbf{S}_{max} = \mathbf{S}_{max} \cup N_i$  such that  $N_i = \arg \max C_{TX}(N_i)$ ;
  return  $\mathbf{S}_{max}$ ;
  
```

알고리즘 2는 위에서 설명한 *PRIORITY*의 과정을 보여준다. 여기서 $\mathbf{W}(N_i)$ 는 센서노드 N_i 가 보유하고 있지 않은 데이터 패킷 집합이고, $C_{TX}(N_i)$ 는 센서노

알고리즘 3. Procedure of SELECTION(S)

```

for  $\forall N_i \in \mathbf{S}$ 
  if  $|\mathbf{H}(N_i)| \geq 2$  and  $|\mathbf{A}(N_i)| \geq 2$ 
    for  $\forall \{d_j, d_k\} \subseteq \mathbf{H}(N_i)$  such that  $d_j \neq d_k$ 
       $\mathbf{C}_{NC}(N_i, d_j, d_k) = \emptyset$ ;
    for  $\forall \{N_l, N_m\} \subseteq \mathbf{A}(N_i)$  such that  $N_l \neq N_m$ 
      if  $d_j \in \mathbf{W}(N_l) \cap \mathbf{H}(N_m), d_k \in \mathbf{H}(N_l) \cap \mathbf{W}(N_m)$ 
        or  $d_j \in \mathbf{H}(N_l) \cap \mathbf{W}(N_m), d_k \in \mathbf{W}(N_l) \cap \mathbf{H}(N_m)$ 
           $\mathbf{C}_{NC}(N_i, d_j, d_k) = \mathbf{C}_{NC}(N_i, d_j, d_k) \cup \{N_l, N_m\}$ ;
  if  $|\mathbf{H}(N_i)| \geq 1$ 
    for  $\forall d_j \in \mathbf{H}(N_i)$ 
       $\mathbf{C}_{UC}(N_i, d_j) = \emptyset$ ;
    for  $\forall N_l \in \mathbf{A}(N_i)$ 
      if  $d_j \in \mathbf{W}(N_l)$ 
         $\mathbf{C}_{UC}(N_i, d_j) = \mathbf{C}_{UC}(N_i, d_j) \cup N_l$ ;
  Select  $\{\hat{N}_i, \hat{d}_j, \hat{d}_k\} = \arg \max (|\mathbf{C}_{NC}(N_i, d_j, d_k)|)$ ;
  Select  $\{\hat{N}_i, \hat{d}_j\} = \arg \max (|\mathbf{C}_{UC}(N_i, d_j)|)$ ;
  if  $|\mathbf{C}_{NC}(\hat{N}_i, \hat{d}_j, \hat{d}_k)| > |\mathbf{C}_{UC}(\hat{N}_i, \hat{d}_j)|$ 
    return  $\{\hat{N}_i, \hat{d}_j \oplus \hat{d}_k\}$ ;
  else
    return  $\{\hat{N}_i, \hat{d}_j\}$ ;
  
```

드 N_i 가 보유한 모든 데이터 패킷에 대해 각 데이터 패킷을 보유하고 있지 않은 센서노드의 수를 구하여 더한다. 이 값은 동일한 센서노드에 대해 중복을 허용하므로 총 센서노드의 수보다 클 수 있다. S_{max} 는 전송 후보 센서노드 집합이다.

알고리즘 3은 위에서 설명한 *SELECTION*의 과정을 보여준다. 여기서 $A(N_i)$ 는 센서노드 N_i 의 이웃 센서노드 집합이다. $C_{NC}(N_i, d_j, d_k)$ 는 센서노드 N_i 가 d_j 와 d_k 를 네트워크 부호화를 통해 전송했을 때 수신 가능한 이웃 센서노드 집합이다. $C_{UC}(N_i, d_j)$ 는 센서노드 N_i 가 d_j 를 비부호화를 통해 전송했을 때 수신 가능한 이웃 센서노드 집합이다. \hat{N}_i 는 전송을 위해 선택된 노드이고, $\hat{d}_j \oplus \hat{d}_k$ 또는 \hat{d}_j 는 전송을 위해 선택된 데이터 패킷이다.

IV. 실험 결과

일반적인 네트워크 토폴로지에서 실험을 위해 40×40 의 공간에 센서노드들을 랜덤한 위치에 배치시킨다. 이때, 각 센서노드는 랜덤한 2개의 정수 값을 2차원 좌표 값으로 갖고, 직접 데이터 패킷 전송 및 수신 가능한 이웃노드와의 거리는 최대 10으로 설정하였다. 또한 네트워크 상의 임의의 센서노드 쌍에 대해 적어도 하나의 경로가 존재하는 네트워크 토폴로지만을 고려하여 10,000번의 실험을 수행하여 평균 값을 구하였다. 모든 실험은 주어진 조건 하에서 랜덤한 순서의 비부호화 전송 방식(Rand. UC-TX), 랜덤한 순서의 네트워크 부호화 전송 방식(Rand. NC-TX), 제안하는 네트워크 부호화 전송 방식(Prop. NC-TX)에 대해 모든 센서노드가 모든 데이터 패킷을 공유할 때까지 총 전송 횟수를 구하여 비교하였다. 본 실험에서 랜덤한 순서의 비부호화 전송 방식과 랜덤한 순서의 네트워크 부호화 전송 방식은 전송을 위한 노드와 전송할 데이터 패킷을 랜덤하게 선택한다. 특히 랜덤한 순서의 네트워크 부호화 전송 방식은 랜덤하게 선택된 노드가 네트워크 부호화 가능한 패킷을 보유하고 있으면 네트워크 부호화된 데이터 패킷을 전송하고 그렇지 않은 경우 비부호화 데이터 패킷을 전송한다고 가정하였다.

그림 3은 세 가지 전송 방식들의 센서노드 수 대비 총 전송 횟수를 비교한 것이다. 모든 경우에서 제안하는 방식이 가장 좋은 성능을 보이며 네트워크 상에 존재하는 센서노드의 수가 커질수록 성능 차이는 벌어

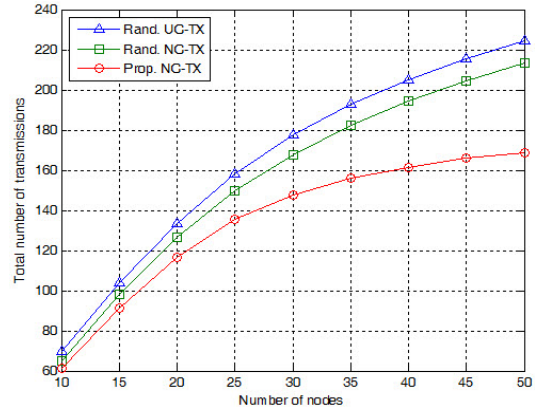


그림 3. 랜덤한 순서의 비부호화 전송 방식, 랜덤한 순서의 네트워크 부호화 전송 방식, 제안하는 네트워크 부호화 전송 방식 간의 센서노드 수 대비 총 전송 횟수 비교 (데이터 패킷 수: 12개, 대표 센서노드 수: 3개, 수신 실패 확률: 0.05). Fig. 3. Total number of transmissions versus the number of sensor nodes for uncoded transmission method in random order, network coding-based transmission in random order, and the proposed network coding-based transmission(The number of data packets: 12, the number of heads: 3, the probability of reception failure: 0.05).

진다. 특히 센서노드 수가 50개인 경우, 제안하는 방식은 랜덤한 순서의 비부호화 전송 방식 대비 약 25%가 감소하였고, 랜덤한 순서의 네트워크 부호화 전송 방식 대비 약 21%가 감소하였다. 노드 수가 증가함에 따라 총 전송 횟수가 선형적으로 증가하지 않는 이유는 제한된 공간에서 노드의 밀도가 증가하면 평균 원홉 노드 수가 증가하므로 매 전송 시 데이터를 수신하는 노드 수도 증가하기 때문이다. 이러한 현상은 제안된 네트워크 부호화 기법과 결합되어 더욱 두드러지게 나타난다.

그림 4는 세 가지 전송 방식들의 데이터 패킷 수 대비 총 전송 횟수를 비교한 것이다. 그림 3의 센서노드 수의 증가에 따른 성능 차이보다는 차이가 크지 않으나 모든 경우에 대해 제안하는 방식이 가장 좋은 성능을 보이며 공유하고자하는 데이터 패킷의 수가 커질수록 성능 차이는 벌어진다. 특히 데이터 패킷 수가 48개인 경우, 제안하는 방식은 랜덤한 순서의 비부호화 전송 방식 대비 약 14%가 감소하였고, 랜덤한 순서의 네트워크 부호화 전송 방식 대비 약 8%가 감소하였다. 데이터 패킷 수가 증가함에 따라 총 전송 횟수는 선형적으로 증가하며, 전송할 데이터 패킷 수가 작을 때는 네트워크 부호화 기회가 줄어들므로 각 기법별 총 전송 횟수의 차이가 두드러지지 않는다.

그림 5는 세 가지 전송 방식들의 수신 실패 확률 대비 총 전송 횟수를 비교한 것이다. 이 경우 역시 제

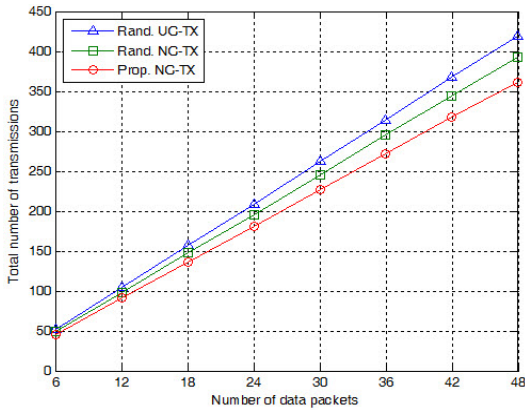


그림 4. 랜덤한 순서의 비부호화 전송 방식, 랜덤한 순서의 네트워크 부호화 전송 방식, 제안하는 네트워크 부호화 전송 방식 간의 데이터 패킷 수 대비 총 전송 횟수 비교 (센서노드 수: 15개, 대표 센서노드 수: 3개, 수신 실패 확률: 0.05).
Fig. 4. Total number of transmissions versus the number of data packets for uncoded transmission method in random order, network coding-based transmission in random order, and the proposed network coding-based transmission(The number of sensor nodes: 15, the number of heads: 3, the probability of reception failure: 0.05).

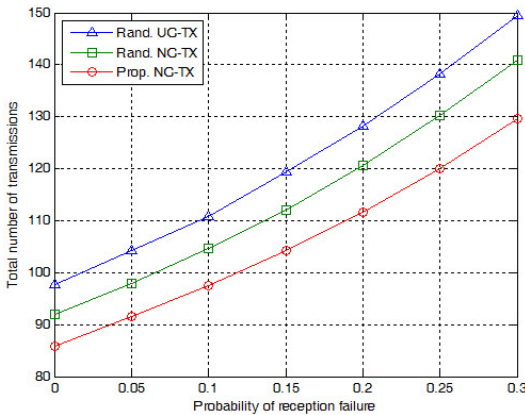


그림 5. 랜덤한 순서의 비부호화 전송 방식, 랜덤한 순서의 네트워크 부호화 전송 방식, 제안하는 네트워크 부호화 전송 방식 간의 수신 실패 확률 대비 총 전송 횟수 비교 (센서노드 수: 15개, 데이터 패킷 수: 12개, 대표 센서노드 수: 3개).
Fig. 5. Total number of transmissions versus the probability of reception failure for uncoded transmission method in random order, network coding-based transmission in random order, and the proposed network coding-based transmission(The number of sensor nodes: 15, the number of data packets: 12, the number of heads: 3).

안하는 방식이 가장 좋은 성능을 보이며 수신 실패 확률이 커질수록 성능 차이는 벌어진다. 특히 수신 실패 확률이 0.3인 경우, 제안하는 방식은 랜덤한 순서의 비부호화 전송 방식 대비 약 13%가 감소하였고, 랜덤한 순서의 네트워크 부호화 전송 방식 대비 약 8%가 감소하였다. 수신 실패 확률이 증가함에 따라 총 전송

횟수도 증가하며, 수신 실패 확률이 작을수록 재전송이 횟수가 줄기 때문에 각 기법별 총 전송 횟수의 차이도 줄어들게 된다.

그림 6은 세 가지 전송 방식들의 대표 센서노드 수 대비 총 전송 횟수를 비교한 것이다. 이 경우 역시 제안하는 방식이 가장 좋은 성능을 보이며 대표 센서노드의 수가 커질수록 성능 차이는 벌어진다. 특히 대표 센서노드 수가 15인 경우, 제안하는 방식은 랜덤한 순서의 비부호화 전송 방식 대비 약 19%가 감소하였고, 랜덤한 순서의 네트워크 부호화 전송 방식 대비 약 7%가 감소하였다. 여기서 한 가지 주목할 점은 비부호화 전송 방식은 대표 센서노드의 수가 증가하더라도 총 전송 횟수가 감소하지 않은 반면 네트워크 부호화 전송 방식은 대표 센서노드의 수가 증가함에 따라 네트워크 부호화 기회의 증가로 인해 총 전송 횟수가 감소한다는 점이다.

그림 7은 제안하는 방식이 각 노드별 균일한 에너지 소모를 보장하는지 확인하기 위하여 노드별 평균 전송 횟수를 실험한 것이다. 최초 정보를 보유하고 있는 대표 센서노드를 포함하여 모든 센서노드의 최소 전송횟수의 평균은 12.2회이고 최대 전송횟수의 평균은 14.2회로 정보 공유를 위하여 20개의 센서노드가 매우 균일하게 전송 에너지를 소모하고 있음을 확인하였다.

네트워크 부호를 사용하는 경우 연산량 증가로 인하여 노드의 실제 에너지 소모가 증가하게 된다. [15]에 의하면 실제 스마트폰에서 1,600바이트 길이를 갖

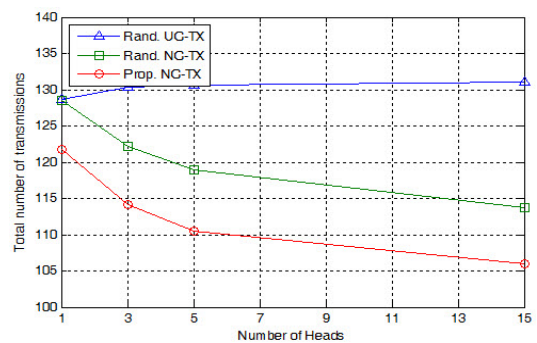


그림 6. 랜덤한 순서의 비부호화 전송 방식, 랜덤한 순서의 네트워크 부호화 전송 방식, 제안하는 네트워크 부호화 전송 방식 간의 대표 센서노드 수 대비 총 전송 횟수 비교 (센서노드 수: 15개, 데이터 패킷 수: 15개, 수신 실패 확률: 0.05).
Fig. 6. Total number of transmissions versus the number of heads for uncoded transmission method in random order, network coding-based transmission in random order, and the proposed network coding-based transmission(The number of sensor nodes: 15, the number of data packets: 15, the probability of reception failure: 0.05).

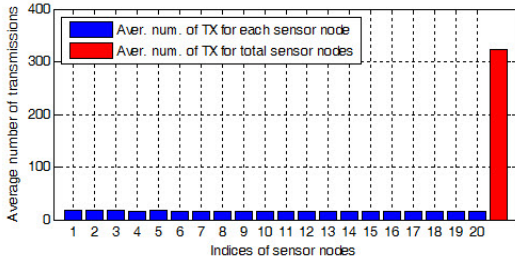


그림 7. 제안하는 기법의 센서노드 별 평균 전송 횟수(센서노드 수: 20개, 데이터 패킷 수: 32개, 대표 센서노드 수: 4개, 수신 실패 확률: 0.1).

Fig. 7. Average number of transmissions of each sensor node for proposed scheme(The number of sensor nodes: 20, the number of data packets: 32, the number of heads: 4, the probability of reception failure: 0.1).

는 수십에서 수백 개의 패킷에 이진 네트워크 부호화를 사용한 경우 네트워크 부호화 연산에 따른 에너지 소모가 데이터 전송을 위한 에너지 소모 대비 수십에서 수백분의 일로 측정되었다. 그림 8은 이 비율이 1%에 해당하는 32개의 패킷을 전송한 경우에 대해 제안하는 기법을 적용했을 때 노드 수 증가에 따른 전체 전송횟수 대비 네트워크 부호화 전송횟수의 평균적인 비율을 실험한 결과이다. 이를 통해 실제적으로 네트워크 부호화로 인한 추가적인 연산은 매 전송 시 일어나는 것이 아니라 18%~25% 전송 시에만 일어남을 확인하였다. 따라서 1,600바이트보다 더 짧은 길이의 패킷을 사용하는 센서노드의 경우 네트워크 부호

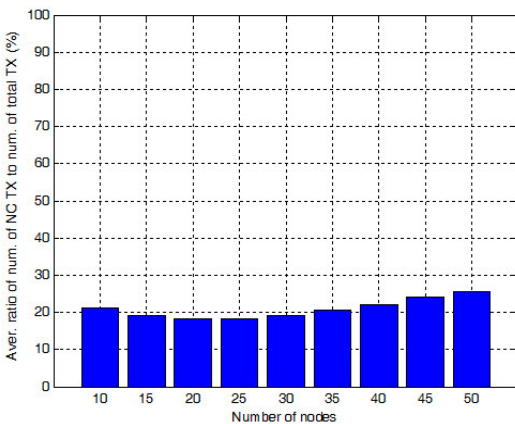


그림 8. 제안하는 기법의 센서노드 수 증가에 따른 전체 전송횟수 대비 네트워크 부호화 전송횟수의 평균적인 비율(데이터 패킷 수: 32개, 대표 센서노드 수: 4개, 수신 실패 확률: 0.1).

Fig. 8. Average ratio of number of network coded transmissions to number of total transmission versus the number of sensor nodes for proposed scheme(The number of data packets: 32, the number of heads: 4, the probability of reception failure: 0.1).

화 연산에 따른 에너지 소모는 데이터 전송에 따른 에너지 소모에 비해 매우 미미하다.

V. 결론

본 논문에서는 계층적 네트워크에서 일부 대표 센서노드에게만 분할되어 전달된 정보를 센서노드들이 직접 통신을 통해 공유하고자 할 때 동적으로 전송 노드 및 전송 데이터를 선택하는 네트워크 부호화 기법을 통해 총 전송 횟수를 효과적으로 감소시킬 수 있음을 확인하였다. 본 논문의 연구 결과를 토대로 향후 추가 연구로서 (1) 각 센서노드가 획득할 수 있는 네트워크 정보가 제한적일 때 효과적인 정보 공유 기법, (2) 센서노드 간 간섭을 고려하여 동시 전송을 허용하는 시나리오에서 효과적인 정보 공유 기법, (3) 실제 무선 센서 네트워크 시스템에서 네트워크 부호화 기법을 사용한 센서노드의 에너지 소모 분석 등을 고려할 수 있다.

References

- [1] A. Al-Fuqaha, M. Guizani, M. Mohammadi, M. Aledhari, and M. Ayyash, "Internet of things: A survey on enabling technologies, protocols and applications," *IEEE Commun. Surveys & Tuts.*, vol. 17, no. 4, pp. 2347-2376, 2015.
- [2] 김종현, 김재우, 유석, 이재용, "M2M/IoT 서비스를 위한 무선 통신망 기술," *KICS Inf. and Commun. Mag.*, vol. 30, no. 8, pp. 11-19, Jul. 2013.
- [3] T. Yang, Y. Yim, and K. Jung, "Reliable real-time data dissemination protocol in wireless sensor networks," *J. KICS*, vol. 40, no. 8, pp. 1567-1576, Aug. 2015.
- [4] B. H. Ko, K.-J. Jeon, S. R. Lee, and K. S. Kim, "Distributed multi-hop multicast transmission scheme for low-power and low-complexity wireless devices," *J. KICS*, vol. 40, no. 5, pp. 931-937, May 2015.
- [5] J.-H. Kim, D. Park, and H.-Y. Song, "Transmission strategy using network coding for energy-efficient IoT network," in *Proc. Int. Conf. Commun.*, pp. 278-279, Nov. 2015.
- [6] R. Ahlswede, N. Cai, S.-Y. R. Li, and R. W.

Yeung, "Network information flow," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 46, no. 4, pp. 1204-1216, Jul. 2000.

[7] D. Nguyen, T. Nguyen, and B. Bose, "Wireless broadcast using network coding," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 58, no. 2, pp. 914-925, Feb. 2009.

[8] J.-H. Kim, J. Kim, K. Lim, and D. S. Kwon, "Network coding-based ARQ scheme with overlapping selection for resource limited multicast/broadcast services," *WASET*, vol. 6, no. 10, pp. 1144-1149, Oct. 2012.

[9] J.-H. Kim, J. Park, and H.-Y. Song, "Maximum weight clique search for instantly decodable network coding-based broadcast," *JCCI*, Yeosu, Korea, Apr. 2014.

[10] S. W. Choi, J. Kim, and Y.-K. Kim, "Efficient Broadcast Scheme Based on Ergodic Index Coding," *J. KICS*, vol. 40, no. 8, pp. 1500-1506, Aug. 2015.

[11] M. Yu, N. Aboutorab, and P. Sadeghi, "From instantly decodable to random linear network coded broadcast," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 62, no. 11, pp. 3943-3955, Nov. 2014.

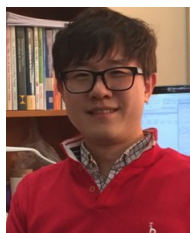
[12] M. Gonen and M. Langberg, "Coded cooperative data exchange problem for general topologies," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 61, no. 10, pp. 5656-5669, Oct. 2015.

[13] Z. Dong, S. H. Dau, C. Yuen, Y. Gu, and X. Wang, "Delay minimization for relay-based cooperative data exchange with network coding," *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 12, no. 6, pp. 1890-1902, Dec. 2015.

[14] C. Fragouli, J. Widmer, and J.-Y. L. Boudec, "A network coding approach to energy efficient broadcasting: from theory to practice," in *Proc. IEEE INFOCOM*, pp. 1-11, Barcelona, Spain, Apr. 2006.

[15] A. Paramanathan, M. V. Pedersen, D. E. Lucani, F. H. P. Fitzek, and M. Katz, "Energy and power measurements for network coding in the context of green mobile clouds," in *Proc. IEEE ISWCS*, pp. 1-5, Ilmenau, Germany, Aug. 2013.

김 정 현 (Jung-Hyun Kim)



2006년 8월 : 연세대학교 전기
전자공학과 졸업
2008년 8월 : 연세대학교 전기
전자공학과 석사
2010년 7월~2013년 2월 : 한국
전자통신연구원 연구원
2013년 3월~현재 : 연세대학교
전기전자공학과 박사과정
<관심분야> 통신공학, 정보이론, 부호이론, 분산저
장시스템

박 다 빈 (Dabin Park)



2014년 2월 : 아주대학교 전자공
학과 졸업
2014년 3월~현재 : 연세대학교
전기전자공학과 석사과정
<관심분야> 통신공학, 네트워크
부호, 부호이론, 암호이론

송 흥 엽 (Hong-Yeop Song)



1984년 2월 : 연세대학교 전자
공학과 졸업
1986년 5월 : University of
Southern California Dept. of
EE. Systems 석사
1991년 12월 : University of
Southern California Dept. of
EE. Systems 박사
1992년 1월~1993년 12월 : Post-Doc Research
Associate, University of Southern California Dept.
of EE. Systems
1994년 1월~1995년 8월 : Senior Engineer, Qualcomm
Inc., San Diego, California.
2002년 3월~2003년 2월 : Visiting Professor,
University of Waterloo, Canada
1995년 9월~현재 : 연세대학교 전기전자공학과 교수
<관심분야> 통신공학, 정보이론, 부호이론, 암호이론,
이산수학