

---

# MANETs에서 양방향 트래픽에 대한 네트워크 코딩기법의 성능 평가

김관웅\* · 김용갑\*\* · 배성환\*\*\* · 김대익\*\*\*\*

## Performance Evaluation of Network Coding in MANETs for Bidirectional Traffic

Kwan-Woong Kim\* · Yong-Kab Kim\*\* · Sung-Hwan Bae\*\*\* · Dae-Ik Kim\*\*\*\*

### 요 약

네트워크 코딩기법은 여러 개의 패킷을 하나의 패킷으로 압축하여 전송하는 기법으로 무선네트워크에 적용할 경우, 패킷전달횟수를 감소시킬 수 있고 채널효율성을 향상할 수 있어 관련 연구들이 활발히 이루어지고 있다. 본 논문에서는 멀티홉 Ad-hoc 네트워크에서 양방향트래픽 서비스를 위해 라우팅계층과 IP계층에 네트워크코딩기법을 적용하였다. 시뮬레이션 분석결과 트래픽부하와 종단간 홉수가 높을수록 네트워크 코딩이득이 증가하였다.

### ABSTRACT

Network coding is that the nodes can combine and mix the packets rather than merely forward them. Therefore, network coding is expected to improve throughput and channel efficiency in the wireless network. Relevant researches have been carried out to adapt network coding to wireless multi-hop network. In this paper, we designed the network coding for bidirectional traffic service in routing layer and IP layer of Ad-hoc network. From the simulation result, the traffic load and the end to end distance effect the performance of the network coding. As end to end distance and the traffic load become larger, the gain of network coding become more increased.

### 키워드

Multi-hop wireless network, network coding, MAC, routing  
멀티홉 무선네트워크, 네트워크코딩, MAC, 라우팅

## 1. 서론

최근 WLAN (Wireless Local Area Network)은 짧은 범위의 무선 연결을 위한 일반적인 기술이 되었다. 또한 지속적인 하드웨어 가격의 하락으로 인해, 무선 디바이스 수가 급격히 증가하였다. 기존의 무선기술의 목적은 많은 수의 무선노드들을 연결하는데 있었지만,

다수의 무선노드들이 송신을 위해 동시에 채널을 접속하기위해 경쟁할 경우 무선네트워크의 성능이 저하된다. 무선 Ad-hoc 네트워크의 문제점은 성능이 저하된다[1~3]. 따라서 이와 같은 문제점을 해결하고 무선성능을 향상하기 위해 네트워크 코딩기법이 제안되었다[4~8]. 네트워크 코딩은 단순히 패킷을 전달하는 기존의 라우팅방식과는 달리 패킷을 전달하는 중간노

---

\* ㈜센더테크놀로지(kwkim@thunderspeaker.com)

\*\*\*\* 교신저자 : 전남대학교 교수(daeik@jnu.ac.kr)

접수일자 : 2012. 03. 12

심사(수정)일자 : 2012. 03. 23

게재확정일자 : 2012. 06. 07

드에서 입력되는 패킷들을 하나의 패킷으로 압축하여 전송하는 기법으로 네트워크 자원을 효율적으로 이용하여 네트워크 전송속도를 향상시키는데 목적이 있다.

그림1은 네트워크 코딩에 대한 대표적인 예를 보여주고 있다.

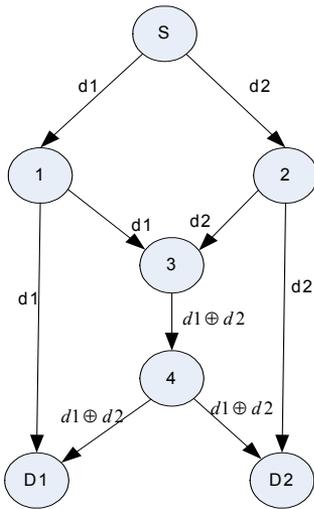


그림 1. 코딩네트워크의 예  
Fig. 1 An example of network coding

그림 1에서 노드 S는 데이터 d1과 d2를 목적지 D1과 D2로 전송한다. 기존 방식에서는 노드 3은 노드 4로 d1과 d2 두 개의 메시지를 보내야 하나, 네트워크 코딩기법에서는 노드 3은 수신된 d1과 d2를 XOR연산으로 부호화하여 하나의 데이터로 전송할 수 있다. 따라서 기존방식보다 메시지 전송시간을 반으로 줄일 수 있다. 최종 수신 노드인 D1과 D2에서는 각각 d1과 d2의 정보를 수신한 상태이므로, 식 1과 같이 XOR로 압축된  $d_1 \oplus d_2$ 를 복호화 하여 새로운 데이터 d1, d2를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} d_1 &= d_2 \oplus (d_1 \oplus d_2) = 0 \oplus d_1 \\ d_2 &= d_1 \oplus (d_1 \oplus d_2) = 0 \oplus d_2 \end{aligned} \quad (1)$$

네트워크 코딩의 본래 목적은 유선네트워크의 멀티캐스트 처리용량을 향상시키기 위해 연구되었으나 무선네트워크에도 적용 가능하며, 멀티캐스트 및 브로드캐스트 환경에서 네트워크 코딩이 무선네트워크의 용량을 향상시킬 수 있다[6]. 그러나 네트워크 코딩을 무

선 멀티홉 네트워크에 적용하기 위해 고려할 사항들이 존재한다. 이는 무선 멀티홉 네트워크가 가지는 특성과 네트워크 코딩에서 요구하는 사항들을 포함한다.

무선매체의 특성은 높은 비트 오류, 방송특성 및 채널간의 간섭 때문에 패킷손실이 발생할 확률이 크며, 이에 따라 수신노드에서 부호화된 패킷을 복호화하지 못할 확률이 높아진다. 또한 낮은 트래픽부하에서는 여러 개의 패킷을 수신할 확률이 낮기 때문에 네트워크 코딩 기회가 적게 된다. 높은 트래픽부하에서는 노드에서 여러 개의 패킷을 수신할 확률이 높기 때문에 네트워크 코딩기회가 높아 네트워크 성능을 향상시킬 수 있으나, 네트워크 코딩패킷의 방송에 따른 패킷손실이 증가하게 된다.

본 논문에서는 선형 멀티 홉 Ad hoc 네트워크에서 양방향 트래픽 서비스를 위한 네트워크 코딩기법을 적용하기 위해 고려해야 하는 사항들에 대해 논의하고 트래픽의 용량, 멀티 홉 수 등의 변수에 대한 네트워크코딩의 효율성을 시뮬레이션을 통해 분석한다.

## II. 네트워크 코딩기법 구현

멀티홉 Ad-hoc 네트워크에서 양방향 트래픽에 대한 네트워크 코딩의 성능을 평가하기 위해 이동노드의 라우팅과 IP계층에 네트워크코딩기법을 구현하였다.

### 2.1. 시스템 모델

양방향 트래픽에 대한 네트워크코딩기법의 성능을 평가하기 위한 네트워크 모델은 그림 2와 같다. 노드는 n개로 구성되며, 1번째 노드  $N_1$ 과  $N_n$ 은 데이터를 양방향으로 송수신한다.  $N_1 \sim N_{n-1}$ 에서 네트워크코딩을 위한 패킷부호화가 수행된다. 모든 중간노드에서 네트워크코딩이 수행되면 이론상 최대 네트워크 코딩 이득은 2가 된다.

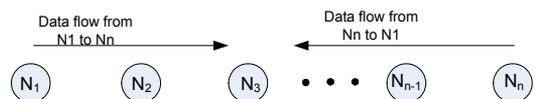


그림 2. 네트워크 모델  
Fig. 2 Network model

네트워크 코딩은 각 노드에 도착하는 데이터 패킷의 동기가 정확하다고 가정한다. 그러나 실제 네트워크에서는 패킷손실, 충돌, 혼잡현상에 의해 각 노드에 도착하는 패킷 수는 일정치 않다[7]. 따라서 중간노드에서는 패킷이 도착하면, 네트워크 코딩기법은 패킷 코딩을 위해 버퍼링을 수행한다. 버퍼링은 네트워크코딩 실행 확율을 높여 성능을 향상할 수 있다. 반면, 종단간 지연시간은 버퍼링지연시간이 더해지기 때문에 증가한다.

## 2.2. 양방향 유니캐스트를 위한 네트워크 코딩

양방향 트래픽에 대한 네트워크 코딩을 수행하기 위해서는 연결(Connection)을 식별할 수 있어야 한다. 연결식별을 위해서는 각 연결마다 고유한 식별자를 생성하여 할당한다. 구현한 네트워크코딩기법에서는 연결식별자를 생성하기 위해 송신지주소와 수신지주소로 32비트 hash 값을 생성한다. 송신측에서는 연결식별자(cID: Connection Identifier)를 송신할 패킷의 IP 헤더의 예약필드(reserved field)에 기록하여 전송하며, 중간노드에서는 cID를 위한 가상버퍼 (queue)를 생성하여 패킷의 임시저장 공간으로 사용한다.

무선 노드에서 네트워크코딩 처리를 위한 의사코드(pseudo code)는 다음과 같다. 여기에서 receive\_packet 함수는 라우팅계층에서 패킷을 처리하는 의사코드이다. 일반 패킷이 도착하면, 연결식별자 cID를 구하고, 패킷을 전달(forwarding)하는 경우, 네트워크코딩 패킷 복호화와 부호화를 위해 cID의 가상버퍼 queue[cID]에 저장한다. 또한 일정시간 네트워크코딩을 수행할 수 없을 경우를 대비하여 타이머를 설정한 후 타이머가 만료되면 버퍼에 대기하고 있는 패킷을 다음 홉으로 전송한다. queue[cID]에 이전에 도착한 패킷이 대기하고 있으면, 두 패킷을 부호화 및 압축하여 즉시 전송한다. 네트워크 코딩된 패킷(coded packet)이 도착하면 연결식별자에 해당하는 버퍼queue[cID]에서 복호화가능 패킷을 찾아 복호화한 후, 일반패킷과 동일한 처리를 수행한다.

### 변수정의:

cID : 연결식별자

p, p1 : packet

queue[cID] : 연결식별자 cID의 가상버퍼

T : 기본 타이머 설정값

### Function : receive\_packet(p1)

```
{
    cID = find_cID(p1);
    if(src_addr(p1) == my_addr) { /* I am originator
        */
        write_NC_header(p1, cID);
        /* buffering p1 for further decoding the coded
        packet */
        queue[cID].enqueue(p1);
        forward(p1);
    }
    else {
        if(p1 == NC_PACKET) /* if p1 is coded
        packet */
            if(p1 is enable to decode){
                p = decode_pkt(p1, queue(cID));
                delete p1;
                receive_packet(p);
            }
            else delete p1;
        else {
            if (p1 != NC_PACKET){
                if(dst_addr(p1) == my_addr){
                    send_to_upperlayer(p1);
                }
                else {
                    if(p2 = find_encodable_pkt(buf, p1)){
                        Cancel_timer(p2);
                        p = encode(p1, p2);
                        broadcasts(p);
                    }
                }
            }
            else {
                queue[cID].enqueue(p1);
                Set_Timer(cID, T); /* T is Timer
                interval */
            }
        }
    }
}
```

### Function: Timer\_expired(cID)

```
{
```

```

if(queue[cID] is not empty)
    p = queue[cID].dequeue();
    forward(p);
}
    
```

### III. 양방향 트래픽의 성능평가

#### 3.1. 시뮬레이션 환경

멀티홉 Ad-hoc 네트워크에서 네트워크코딩성능을 평가하기 위해 라우팅계층에 네트워크 코딩을 모델링하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션을 위해 Glomosim[9] 시뮬레이터를 사용하였으며, 네트워크 모델은 노드 밀집 효과를 조사하기 위해 2.6km×2.6km 영역에 선형토폴로지 형태로 3~9개의 무선 노드로 구성하였다.

중단노드에서 CBR/UDP(Constant Bit Rate/User Datagram Protocol) 트래픽을 발생시키며, 패킷크기는 1024바이트, 패킷 간 도착시간(packet inter-arrival time)은 0.05~1 sec로 범위를 가진다. 따라서 트래픽 부하는 1~50KBps(Byte per second)의 범위를 가진다. 무선채널 대역폭은 2Mbps로 설정하였다. 각 노드는 IEEE 802.11 프로토콜[10]을 사용하였고, 채널 모델은 무선 채널/무선 물리 전송 모델을 이용하였다. 라디오 전송 모델로 Two Ray Ground 모델을 사용하였으며, 무선 노드의 전송 범위와 간섭 범위는 250m과 550m로 설정하였다. 표 1은 시뮬레이션 환경변수이다.

표 1. 시뮬레이션환경변수  
Table 1. Simulation parameters

Traffic Source	CBR / UDP
Packet size	1Kbytes
Routing protocol	AODV
MAC protocol	IEEE 802.11
Channel bandwidth	2Mbps
Radio channel model	Two ray ground

성능 평가 항목은 다음과 같다.

- 패킷전달율(Packet delivery ratio) :  $m/n$ , 여기에

서  $m$ 은 수신측에서 성공적으로 수신한 패킷 수이며  $n$ 은 전송노드에서 송신한 패킷의 개수이다.

- 네트워크코딩 이득(Network coding gain),  $G_{NC}$ :

$$G_{NC} = \frac{F_{classical} - F_{NC}}{F_{classical}} \quad (2)$$

여기에서  $F_{NC}$ 는 네트워크코딩에서 패킷전달 횟수이고,  $F_{classical}$ 는 기존 방식에서 패킷전달 횟수이다.

#### 3.2. 트래픽부하의 영향

트래픽부하가 네트워크코딩에 주는 영향을 평가하기 위해 5-홉 환경에서 트래픽 부하를 1~50KBps로 증가시켜서 시뮬레이션을 수행하였다.

그림 3은 5-홉에서 패킷전달율이다. 트래픽부하가 20KBps에서 패킷 전달율이 급격히 감소함을 알 수 있다. 이는 20KBps부터 채널부하가 높아져 전송 도중 패킷이 손실되기 때문이다. 20KBps~50KBps에서 네트워크 코딩방식(with NC)이 기존방식(without NC)보다 최대 20%정도의 성능향상을 가짐을 알 수 있다. 이는 중간 노드에서 네트워크코딩을 수행하여 무선채널의 부하를 경감시켜 패킷손실이 감소되었기 때문이다.

그림 4는 중단간 패킷전송지연시간이다. 네트워크 코딩방식이 기존의 방식에 비해 전송지연시간이 증가했음을 알 수 있다. 이는 중간노드에서 패킷을 수신하면, 즉시 전달하지 않고 네트워크 코딩을 위해 버퍼링을 수행하기 때문이다. 그림 5는 CBR 트래픽 부하에 따른 중단에서의 처리율이다. 그림5에서 50KBps에서 처리율이 급격히 감소하는데 이는 무선네트워크에 유입되는 트래픽 부하가 무선채널용량을 많이 초과하여, 혼잡이 발생했기 때문이다.

그림 6은 네트워크 코딩이득을 나타낸다. 네트워크 코딩이득은 트래픽부하가 증가할수록 네트워크 코딩이득이 증가함을 확인할 수 있다. 시뮬레이션에서 패킷크기를 1KByte로 고정했기 때문에 낮은 트래픽에서는 패킷간 간격이 길어지기 때문에 네트워크 코딩 확률이 낮아지고, 패킷간 도착시간이 짧을 수록 (트래픽부하가 높을수록) 중단노드에서 서로 다른 방향에서 도착하는 패킷을 받을 확률이 증가하기 때문에 네트워크 코딩을 수행할 빈도가 증가하여 네트워크코딩

이득이 증가하게 된다.

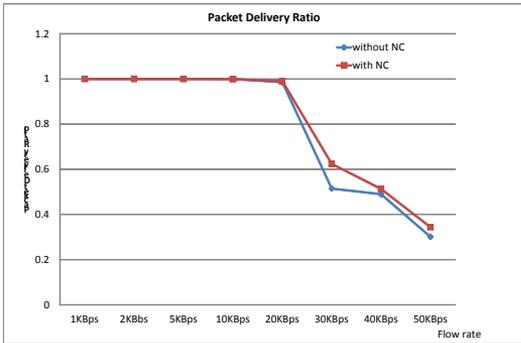


그림 3. 선형토폴로지에서 5-홉 양방향 CBR 트래픽의 패킷 전달율

Fig. 3 Packet delivery ratio of 5-hops CBR traffic in the line topology

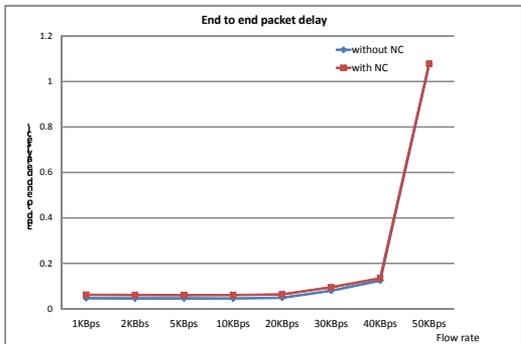


그림 4. 선형토폴로지에서 5-홉 양방향 CBR 트래픽의 평균 종단간 지연시간

Fig. 4 The end-to-end delay of 5-hops CBR traffic in the line topology

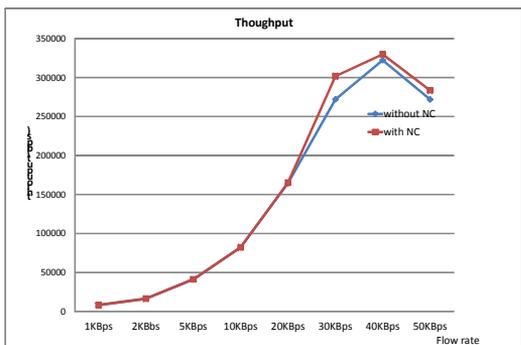


그림 5. 선형토폴로지에서 5-홉 양방향 CBR 트래픽의 처리율

Fig. 5 The throughput of 5-hops CBR traffic in the line topology

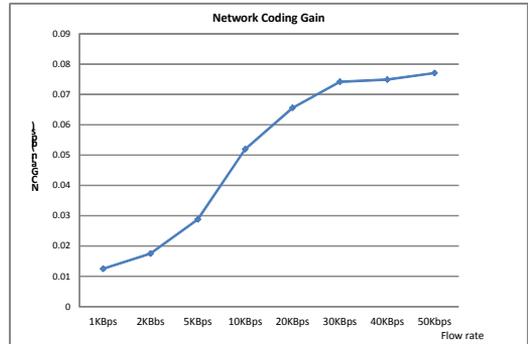


그림 6. 선형토폴로지에서 5-홉 양방향 CBR 트래픽의 네트워크 코딩 이득

Fig. 6 The network coding gain of 5-hops CBR traffic in the line topology

### 3.3. 종단간 홉수의 영향

종단간의 홉 수가 네트워크코딩에 주는 영향을 평가하기 위해 트래픽 부하를 20KBps로 고정시키고 홉수를 3~8-홉까지 증가시키면서 시뮬레이션을 수행하였다.

그림 7은 홉 수에 따른 패킷전달율이다. 5-홉까지는 패킷 손실이 없으나, 6-홉부터 패킷손실이 발생하여 7~8-홉까지 패킷손실이 증가하였다. 비록 IEEE 801.11 프로토콜이 hidden node problem[10]을 극복하기 위해서 RTS-CTS 매커니즘을 사용하지만, 홉 수가 늘어날수록 hidden node problem 현상에 따라 채널간섭이 빈번하게 발생하여 패킷손실이 증가하기 때문이다[12]. 그림 7에서와 같이, 네트워크 코딩 방식을 사용하는 경우, 패킷포워딩이 기존방식에 비해 감소하므로 6~8홉에서 최대 25%의 향상을 보였다.

그림 8은 종단 간 홉 수에 따른 패킷전달 지연시간이다. 네트워크 코딩방식은 패킷의 부호화를 위해 패킷의 버퍼링 및 타이머기법을 사용하기 때문에 패킷이 버퍼에 대기하는 시간만큼 지연시간이 증가하였다.

그림 9는 홉 수에 따른 네트워크코딩 이득을 보여준다. 홉 수가 2일 때 이득이 가장 높고, 홉 수가 증가함에 따라 그래프의 추이가 지속적으로 감소함을 알 수 있다. 5-홉까지는 패킷이 송신노드에서 수신노드로 전달될 때 네트워크 코딩이 최대 한 번 이루어지므로 홉 수가 증가하면 전달횟수도 따라서 증가하여 코딩이득이 감소한다. 6-홉부터는 채널제사용이 가능하고, 패킷간 전달시간이 종단간 지연시간보다 짧아

지므로 한 번 이상의 네트워크코딩이 가능하여 홉 수가 클수록 코딩이득이 일정하게 된다.

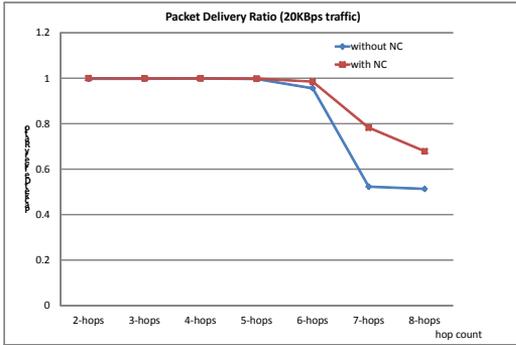


그림 7. 선형토폴로지에서 홉수에 따른 20KBps CBR 트래픽의 패킷전달율  
Fig. 7 The packet delivery ratio of 20KBps CBR traffic in the line topology

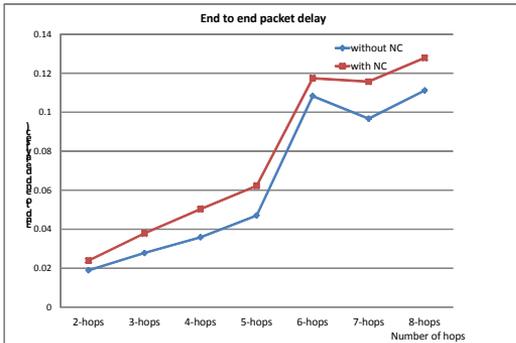


그림 8. 선형토폴로지에서 홉수에 따른 20KBps CBR 트래픽의 종단간 지연시간  
Fig. 8 The end-to-end delay of 20KBps CBR traffic in the line topology

멀티홉 Ad-hoc 네트워크의 시뮬레이션결과를 통해 네트워크코딩이 트래픽부하가 높고 홉 수가 클수록 기존방식보다 무선채널을 효율적으로 사용할 수 있고, 패킷전달율을 향상할 수 있음을 확인하였다. 그러나, 중간노드에서 버퍼링에 의해 지연시간이 증가하므로 실시간을 요구하는 서비스에는 적합하지 않다고 판단 된다.

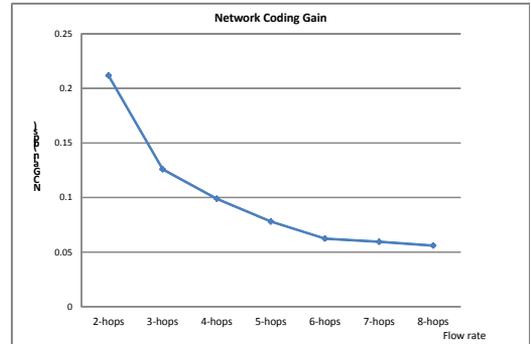


그림 9. 선형토폴로지에서 홉수에 따른 20KBps CBR 트래픽의 네트워크 코딩이득  
Fig. 9 The network coding gain of 20KBps CBR traffic in the line topology

#### IV. 결론

멀티홉 Ad-hoc 네트워크에서 양방향트래픽을 서비스할 때 네트워크계층과 라우팅계층에 네트워크코딩 기법을 적용하였고 시뮬레이션을 통해 적합성을 분석하였다. 분석결과 트래픽 부하량이 낮을 때는 네트워크 부하량 이득이 크지 않고, 기존방식보다 지연시간이 증가하는 단점이 있었다. 그러나, 트래픽부하량이 높고, 홉수가 증가할수록 기존방식에 비해 채널효율과 패킷전달율이 증가하였다.

#### 감사의 글

이 논문은 2010년도 전남대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음

#### 참고 문헌

- [1] C. Fragouli, Dina Katabi, Athina Markopoulou, Muriel Medard and Hariharan Rahul, "Wireless Network Coding: Opportunities & Challenges," in Proc. IEEE MILCOM, pp.1-8, 2007,
- [2] 김영동, "대규모 MANET에서 VoIP 트래픽의 종단간 성능", 한국전자통신학회논문지 6권, 1호, pp. 45-54, 2011.
- [3] 김관용, 김변곤, 배성환, 김대익, "무선 센서 네트워크에서 효율적인 메시지 방송기법", 한국전자통신학회논문지, 5권, 6호, pp. 588~594, 2010.

- [4] R. Ahlswede, Ning Cai, Shuo-Yen Robert Li and Raymond W. Yeung, "Network information flow", IEEE Transaction on Information theory, Vol. 46, pp. 1204-1206, 2000.
- [5] S. Y. R. Li, R. W. Yeung, and N. Cai, "Linear network coding," IEEE Trans. Inform. Theory, Vol. IT-49, No. 2, pp. 371-381, Feb, 2003.
- [6] T. Ho, M. Medard, R. Koetter, D. R. Karger, M. Effros, J. Shi, and B. Leong, "A random linear network coding approach to multicast," IEEE Trans. Inform. Theory, Vol. 52, No. 10, pp. 4413-4430, Oct. 2006.
- [8] P.A Chou, Y. Wu and K. Jain, "Practical network coding", Allerton Conference on Communication, Control and Computing, Monticello, IL, Oct. 2003.
- [9] C. Fragouli, and E. Soljanin, "Information flow decomposition for network coding," IEEE Trans. Inform. Theory, Vol. 52, No. 3, pp. 829-848, Mar. 2006.
- [10] Xiang Zeng, Rajive Bagrodia, Mario Gerla, "GloMoSim: a Library for Parallel Simulation of Large-scale Wireless Networks", Proceedings of the 12th Workshop on Parallel and Distributed Simulations -- PADS '98, May 26-29, 1998 in Banff, Alberta, Canada
- [11] LAN MAN Standards Committee of the IEEE CS, IEEE Std 802.11-1997, Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, Nov. 1997.
- [12] Fu, Z. Zerfos, P. Luo, H. Lu, S. Zhang, L. Gerla, M, "The impact of multihop wireless channel on TCP throughput and loss," INFOCOM 2003. IEEE Societies, 30 March-3 April 2003.

저자 소개



**김관웅(Kwan-Woong Kim)**

1996년 전북대학교 전자공학과 졸업(공학사)  
 1998년 전북대학교 대학원 전자학과 졸업(공학석사)

2002년 전북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사)  
 2009년~현재 한국원자력연구원 선임연구원  
 ※ 관심분야 : 계측제어시스템, 무선통신, 사이버보안



**배성환(Sung-hwan Bae)**

1993년 전북대학교 전자공학과 졸업(공학사)  
 1995년 전북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)

2000년 전북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사)  
 현재 한려대학교 멀티미디어정보통신공학과 교수  
 ※ 관심분야 : ASIC 테스트, 통신시스템 설계



**김용갑(Yong-Kab Kim)**

1988년 이주대학교 전자공학과 공학사  
 1993년 앨라배마주립대 공학석사  
 2000년 노스캐롤라이나주립대 공학박사

2003년~현재 원광대학교 교수  
 ※ 관심분야 : LED 가시광통신, 비선형광학, 광통신시스템, 무선센서네트워크



**김대익(Dae-ik Kim)**

1991년 전북대학교 전자공학과 졸업(공학사)  
 1993년 전북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)

1996년 전북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사)  
 2006년 7월~2007년 6월 미국 오레건 주립대학 교환교수  
 현재 전남대학교 공학대학 전기전자통신컴퓨터공학부 부교수  
 ※ 관심분야 : Ad hoc network, 저전력 VLSI 설계, 데이터 변환기