

# IEEE 802.11s기반 무선 메쉬 네트워크에서 네트워크 코딩 적용을 위한 고려사항 분석

이 규 환\*, 조 성 현\*, 김 재 현°

## Feasibility Analysis of Network Coding Applied to IEEE 802.11s Wireless Mesh Networks

Kyu-Hwan Lee\*, Sunghyun Cho\*, Jae-Hyun Kim°

### 요 약

본 논문에서는 네트워크 코딩을 IEEE 802.11s기반 무선 메쉬 네트워크에 적용을 위한 고려사항에 대하여 분석해 본다. 네트워크 코딩을 무선 네트워크에 적용하기 위한 동작과정을 살펴보고, 이론적인 네트워크 코딩의 이득을 감소시킬 수 있는 중요 요소를 제시한다. 네트워크 성능 평가를 통하여, 네트워크 코딩은 네트워크 처리량 같은 네트워크 성능을 향상할 수는 있지만 전력 소모량 측면에서는 오히려 더 안 좋은 성능이 나타나는 것을 살펴볼 수 있었다. 또한 네트워크 코딩이 적용되기 부적절한 환경에서는 네트워크 코딩 성능이 크게 저하되는 것을 살펴볼 수 있었다.

**Key Words** : Network coding, Wireless LAN, Mesh network, IEEE 802.11s, Power consumption

### ABSTRACT

In this paper, we analyze practical factors to apply the network coding (NC) in the IEEE 802.11s wireless mesh networks. First, we introduce the procedure of the NC in the wireless network. And then we suggest important factors that can cause lower NC gain than theoretical gain. Simulation results show that the NC in wireless networks can reduce the network load but it can cause increased power consumption of wireless nodes. Furthermore, the NC gain can be considerably reduced under the inappropriate network conditions.

### I. 서 론

네트워크 코딩은 유무선 환경에서 멀티캐스트뿐만 아니라 유니캐스트 응용에도 기존의 라우팅 방식을 사용했을 경우보다 더 나은 네트워크 처리량과 통신의 신뢰성을 제공 할 수 있기 때문에 많은 관심을 받고 있다<sup>[1-4]</sup>. 특히 네트워크 코딩이 적용된 무선 네트워크에서는 사슬이나 X형태의 엇들음이

가능한 네트워크 구조에서 기존의 네트워크에서 보다 더 적은 수의 패킷으로 정보를 전달 할 수 있기 때문에 매우 유용하다. 또한 IEEE 802.11시스템처럼 전송 전력 소모량이 수신 전력 소모량보다 우세한 네트워크에서는 전력 감소 효과도 가져올 수 있다. 그러므로 기존에 많은 연구에서 무선 네트워크에서 네트워크 코딩 적용을 다루었다<sup>[5-14]</sup>. 하지만 대부분의 기존 연구에서는 이론적인 측면과 기존의

※ 이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2012-0001554)

※ 이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2010-0023326)

♦ 주저자 : 아주대학교 전자공학과 무선 인터넷 연구실, lovejiyoon7@ajou.ac.kr, 정희원

° 교신저자 : 아주대학교 전자공학과 무선 인터넷 연구실, jkim@ajou.ac.kr, 종신회원

\* 한양대학교 컴퓨터공학과 공학기술연구소, chopro@hanyang.ac.kr, 종신회원

논문번호 : KICS2012-06-290, 접수일자 : 2012년 6월 27일, 최종논문접수일자 : 2012년 11월 2일

시스템과 호환을 고려하지 않고 네트워크 코딩을 위한 시스템을 만드는 일에 초점을 두고 있기 때문에 다음과 같은 네트워크 코딩의 현실적인 오버헤드를 고려되어 있지 않다.

1) 패킷 엿들음: 무선 네트워크에서는 유선이 아닌 무선 매체에 의해 패킷이 전달된다. 그러므로 네트워크 코딩을 수행하는 노드는 무선 매체의 브로드캐스트 특성을 이용할 수 있다. 만약 노드가 주변의 모든 패킷 전송을 엿들 수 있다면 네트워크 코딩을 이용한 부하량 이득을 얻을 수 있다. 네트워크 코딩에서는 하나의 네트워크 코딩된 패킷에 다수의 패킷들의 정보를 담아서 전송하므로 부하량 측면에서 이득이 있을 수 있다. 하지만 네트워크 코딩을 위하여 패킷을 엿들음 하는 것은 전력 소모 측면에서 크게 오버헤드로 작용할 수 있다.

2) 네트워크 구조: 네트워크에서 네트워크 코딩 기회를 얻기 위해서는 체인이나 X 형태의 네트워크 구조가 존재해야 한다. 이러한 네트워크 구조에서만 패킷을 엿들음을 통하여 부하량 측면에서 이득이 있는 네트워크 코딩 패킷 전송이 가능하다. 하지만 네트워크에서 이러한 구조들이 생성되지 않는다면 네트워크 코딩의 이득을 얻을 수 없다.

그러므로 본 논문에서는 선행 연구<sup>[1]</sup>의 결과를 바탕으로 네트워크 부하량 측면에서 실제 이득과 이론적인 이득이 차이가 발생하고, 전력 소모 측면에서 오버헤드가 발생 할 수 있다는 결과를 바탕으로 주변 노드들의 패킷을 엿들음이 가능한 시스템인 무선 메쉬 네트워크에서 네트워크 코딩을 적용할 경우 다양한 성능 평가를 통하여 네트워크 코딩의 이론적인 이득과 실제적인 이득을 비교해 보고 실제적인 이득이 감소하는 이유에 대하여 분석해 본다. 또한 네트워크 코딩을 무선 메쉬 네트워크에 적용하기 위하여 필요한 실제적인 고려사항들을 제시한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 관련 연구에 대하여 살펴본다. 3장에서는 네트워크 코딩을 무선 메쉬 네트워크에 적용하기 위한 절차와 네트워크 코딩의 이득을 감소할 수 있는 요소들에 대하여 살펴본다. 4장에서는 논문에서 제시한 요소들에 대하여 성능 분석을 수행하고 5장에서 결론을 맺는다.

## II. 관련 연구

### 2.1. 이론적 연구

표 1. 용어 정의  
Table 1. Term definition

Terms	descriptions
Coding flow	The flows that are encoded together at a crossover node
Crossover node (Node C)	The node that encodes the packets of coding flows
Broadcasting node (Node B)	One-hop predecessors of the crossover node and the node that broadcasts the packets to be received by crossover and overhearing nodes
Overhearing node (Node O)	One-hop successors of the crossover node and the node that overhears packets from broadcasting nodes and receives packets from crossover nodes
NC node set	Set that includes the crossover, broadcasting, and overhearing nodes

네트워크 코딩은 Ahlswede의 논문에 의해 처음 소개 되었다. Ahlswede의 논문에서는 멀티캐스트 전송 환경에서 네트워크 코딩을 적용하면 기존 라우팅을 사용 했을 경우보다 네트워크 용량이 증가할 수 있고 네트워크 용량이 최대 max-flow min-cut 영역에 도달 할 수 있다는 것을 보였다<sup>[2]</sup>. Li의 연구에서는 코딩 계수를 계산된 영역 이상의 유한 필드에서 선택하면 네트워크 코딩에 선형코드를 사용해도 이론적으로 최대 네트워크 용량에 도달 할 수 있다는 것을 보였다<sup>[3]</sup>. Ho의 논문에서는 처음으로 멀티캐스트에서 RLNC의 개념에 대하여 제시하였다<sup>[4]</sup>. RLNC를 수행하는 노드는 수신한 패킷들을 랜덤하게 선택된 계수로 선형 결합하여 전송 패킷을 생성한다. Ho의 논문에서는 주어진 영역 이상의 크기를 가진 유한 필드에서 계수를 선택 했을 경우 목적노드에서 디코딩 확률을 이론적으로 계산하였고, 그 확률이 1에 가깝다는 것을 보였다. Parag의 연구에서는 중간노드에서 패킷을 네트워크 코딩하기 적합한 네트워크 구조를 생성하기 위한 자원할당이 항상 네트워크 코딩 이득을 제공하는 것이 아니고 어떤 경우에는 해로울 수도 있다는 것을 보였다<sup>[5]</sup>. 또한 네트워크 코딩이득을 위해서는 대칭적인 링크 간 네트워크 코딩을 수행해야 한다는 것을 보였다.

### 2.2. TCP 계층

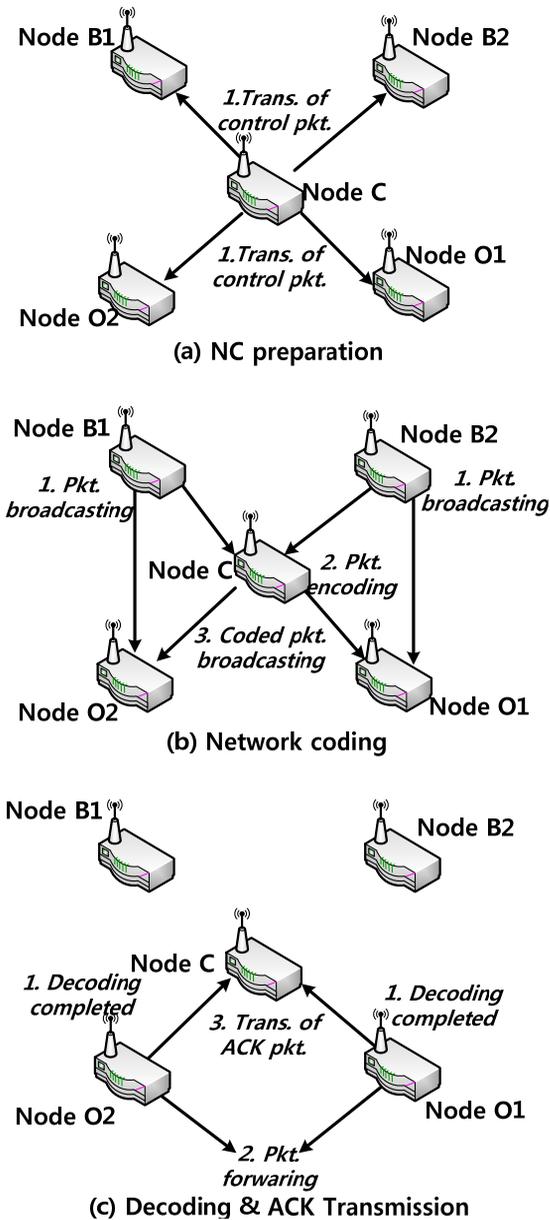


그림 1. 네트워크 코딩 수행 동작 절차  
Fig. 1. Procedure for the operation of the network coding

TCP 계층에서 네트워크 코딩을 적용한 대표적인 연구에는 Sundararajan의 논문이 있다<sup>6)</sup>. TCP/NC 프로토콜은 랜덤 선형 네트워크를 이용하여 TCP로 보고되는 패킷 손실을 감추고, 여분의 네트워크 코딩된 패킷을 전송하여 패킷 손실을 보상하기 때문에 TCP의 성능을 크게 향상 할 수 있다.

### 2.3. 네트워크 계층

네트워크 계층에서는 네트워크 코딩 이득을 향상 하기 위하여 네트워크 코딩 구조를 생성하기 위한 라우팅 연구가 진행되었다<sup>7,8)</sup>. Le의 연구에서는 기존 연구에서 제시한 한 홉의 노드 간 네트워크 코

Octets	2	2	6	6	6~12	4
	Frame Control	Duration	Destination Address	Source Address	Overhearing Address	CRC

그림 2. NC-RTS/CTS의 RTS 패킷 포맷  
Fig. 2. RTS packet format of the NC-RTS/CTS

딩이 아니라 다중 홉의 노드 간 네트워크 코딩 구조를 만드는 라우팅 기법을 제안하였다<sup>7)</sup>. Guo의 연구에서는 Le의 연구를 바탕으로 일반적인 네트워크 코딩 구조 조건을 만들어 그에 따라 라우팅을 수행하는 기법을 제안하였다<sup>8)</sup>.

### 2.4. 링크 계층

일반적으로 네트워크 코딩을 링크 계층에 적용하는 것은 Inter-session과 Intra-session 네트워크 코딩으로 나눌 수 있다. Inter-session 네트워크 코딩에서는 가능하다면 서로 다른 세션의 패킷들을 인코딩한다<sup>9,10)</sup>. 대표적인 연구에는 Katti의 논문이 있다<sup>9)</sup>. Katti의 논문에서는 XOR 네트워크 코딩과 무선 매체의 브로드캐스트 성질을 이용하여 기회적인 엇 들음과 코딩을 수행한다. Intra-session 네트워크 코딩은 같은 세션에 속한 패킷만을 인코딩한다<sup>11,12)</sup>. 대표적으로 Chachulski의 논문이 있다<sup>11)</sup>. Chachulski의 논문에서는 전송되는 각각의 패킷들이 독자적인 정보를 가질 수 있게 RLNC를 사용하는 기회적인 라우팅 기술에 대하여 제안했다.

### 2.5. 물리 계층

네트워크 코딩은 물리계층에도 적용 될 수 있다<sup>13,14)</sup>. Zhang의 논문에서는 원 신호와 결합된 신호를 전파 신호 레벨에서 진폭과 위상 향으로 구성된 방정식으로 나타내어 수신하고자 하는 신호를 복호 하는 방식을 제안했다<sup>13)</sup>. 하지만 이러한 방식은 패킷을 전송하는 두 노드의 전송 동기가 정확하게 맞아야 된다. Katti의 연구에서는 패킷 레벨이 아니라 심볼 단위로 네트워크 코딩을 수행하는 방식을 제안하였다<sup>14)</sup>.

기존의 연구에서는 이론적 연구와 다양한 계층에서 네트워크 코딩 기법을 적용하여 네트워크 성능을 향상하는 기법들이 많이 연구되었다. 하지만 기존의 대부분의 연구에서는 기존 시스템과의 호환 등을 고려하지 않은 채 네트워크 코딩만을 위한 기법이 제안되었다. 기존의 Katti의 논문과 같이 네트워크 코딩 구현 시 필요한 MAC 계층에서의 패킷 엇 들음 정보 및 코딩 패킷 정보에 대한 오버헤드를

표 2. 전력 소모 모델  
Table 2. Model of the power consumption

Type	Power consumption
Transmission (W)	$0.48 \times \text{size} (\mu W \cdot \text{sec}/\text{bytes}) + 431 (\mu W \cdot \text{sec})$
Reception (W)	$0.12 \times \text{size} (\mu W \cdot \text{sec}/\text{bytes}) + 316 (\mu W \cdot \text{sec})$

분석한 연구도 있었지만 대부분의 기존 연구에서는 네트워크 코딩 구현 시 필요한 MAC 계층에서 필요한 제어 패킷 오버헤드, 패킷 엿들음을 위해 필요한 전력소모 오버헤드, 히든 노드 문제를 해결하기 위한 필요한 오버헤드 등이 분석되지 않았고, 링크 계층의 특징, 네트워크 코딩 기회 같은 현실적인 부분들이 고려되지 않았다. 그러므로 본 논문에서는 네트워크 코딩의 이득을 감소시킬 수 있는 요소들을 분석해 본다.

### III. IEEE 802.11s 기반 무선 메쉬 네트워크에서 네트워크 코딩

본 장에서는 IEEE 802.11s 기반 무선 메쉬 네트워크에서 네트워크 코딩을 적용하기 위한 절차와 네트워크 코딩의 성능을 저하할 수 있는 요소들에 대하여 살펴본다.

#### 3.1. 네트워크 코딩 수행 동작 절차

본 장에서는 네트워크 코딩 수행 동작 절차에 대하여 살펴본다. 본 논문에서는 IEEE 802.11s 기반의 고정된 다중 홉 무선 네트워크를 고려하였으며, 라우팅 프로토콜로는 AODV(Ad-hoc On-Demand Vector)를 사용한다<sup>15,16)</sup>. 모든 네트워크 코딩의 기능은 네트워크 계층과 링크계층 사이에 위치한 네트워크 코딩 계층에 구현된다. 사용된 네트워크 코딩 방식은 XOR 코딩이다. 사용되는 용어들은 표 1과 같으며 그림 1은 네트워크 코딩 수행 동작 절차를 나타내며 상세한 과정은 다음과 같다<sup>11)</sup>.

1) 네트워크 코딩 준비: 라우팅 과정에서 네트워크 코딩 노드 집합이 선택된다. 네트워크 코딩 노드 집합이란 교차노드 C와 코딩 플로우 1의 브로드캐스트 노드인 B1, 엿들음 노드인 O1, 그리고 코딩 플로우 2의 브로드캐스트 노드인 B2, 엿들음 노드인 O2를 포함한다. 네트워크 코딩 노드 집합으로 선택되기 위해서는 2가지 조건을 만족해야 된다. 노드 C에서 코딩 플로우 1과 2가 교차해야 된다. 그

리고 노드 O1과 O2가 교차노드 C로부터 받은 인코딩된 패킷은 서로 다른 플로우의 패킷을 인코딩했기 때문에 디코딩하기 위해서는 다른 플로우의 패킷의 정보가 필요하므로 B1이 전송하는 패킷을 노드 O2가 마찬가지로 노드 B2가 전송하는 패킷을 노드 O1이 엿들을 수 있어야 한다. 위의 조건이 만족되면 교차노드 C는 브로드캐스트 및 엿들음 노드들에게 제어 패킷을 전송하고 제어 패킷을 수신한 노드들은 각자의 역할을 표 1과 같이 수행한다.

2) 네트워크 코딩 패킷 생성 및 전송: 브로드캐스트 노드로부터 패킷을 수신한 교차노드는 패킷들을 모든 코딩 플로우로부터 패킷이 수신할 때까지 코딩 버퍼에 저장해 놓는다. 그리고 엿들음 노드들의 패킷 디코딩을 위하여 교차 노드는 코딩 플로우의 패킷을 인코딩하여 전송한다. 교차 노드에서는 한 개의 코딩된 패킷에 여러 패킷을 정보를 담아 전송하기 때문에 네트워크 코딩의 이득을 얻을 수 있다.

3) 디코딩 수행 및 네트워크 코딩 ACK 전송: 브로드캐스트 노드와 교차노드에게서 모든 패킷을 수신한 엿들음 노드는 디코딩을 수행하고 자신이 목적 노드가 아닐 시에는 다음 노드에게 패킷을 전달한다. 자신이 목적 노드일 경우에는 상위 단으로 패킷을 전달한다. 또한 디코딩 완료를 교차노드에게 알리기 위하여 네트워크 코딩 ACK 패킷을 교차노드에게 전달한다. 만약 교차노드에서 일정시간 동안 네트워크 코딩 ACK를 수신하지 못하면 새로운 네트워크 코딩된 패킷을 생성하여 전송한다. 만약 엿들음 노드와 목적노드가 같으면 상위 단으로 패킷을 전달한다.

본 논문에서는 히든 노드 문제 해결과 전력 소모 감소를 위하여 NC-RTS/CTS (NC request to send/clear to send) 옵션을 제공한다. 제한한 NC-RTS/CTS 기술에서 RTS 패킷은 엿들음 주소 같은 추가적인 정보를 갖는다. 엿들음 주소란 전송하는 패킷을 엿들음 노드의 주소를 의미한다. 그러므로 그림 2와 같이 브로드캐스트 노드가 패킷을 전송할 때 수신 주소에는 교차 노드의 주소를 그리고 엿들음 주소에는 엿들음 노드의 주소를 셋팅하고, 교차노드가 패킷을 전송할 때는 엿들음 노드 중 하나의 주소를 수신 주소에 셋팅하고 나머지 노드의 주소를 엿들음 주소에 셋팅한다. 교차노드에서는 최대 2~3개의 플로우만 교차되기 때문에 NC-RTS/CTS의 전송에 의한 오버헤드는 작다<sup>11)</sup>. 그러므로 NC-RTS/CTS를 사용하면 RTS와 CTS 패

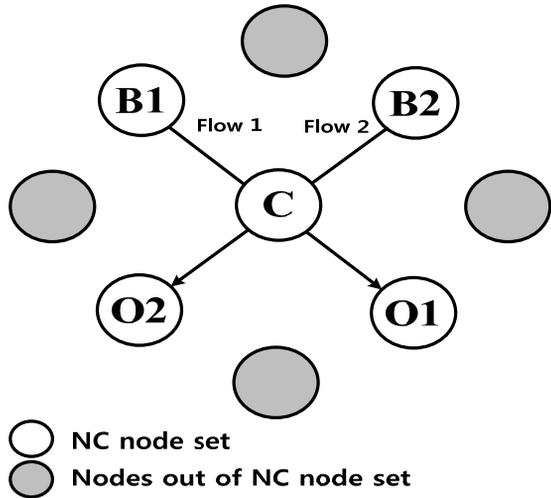


그림 3. 네트워크 코딩 적용 시 불필요한 전력 소모가 발생하는 예시

Fig. 3. Example for the additional power consumption caused by applying the network coding

킷 교환으로 히든 노드 문제도 해결하고 네트워크 코딩과 관련 없는 노드는 모두 슬립 모드로 전환되기 때문에 전력 소모량도 감소할 수 있다.

### 3.2. 네트워크 코딩 이득에 영향을 미치는 요소들

본 장에서는 네트워크 코딩 이득에 영향을 미칠 수 있는 요소들을 제안하고 다음 장에서 성능을 분석해 본다.

1) 패킷 엿들음 시 전력 소모: 기존의 많은 네트워크 코딩 연구에서는 promiscuous 모드를 사용하여 패킷을 엿들음을 수행하였다. 하지만 이는 모든 엿들은 패킷들이 네트워크 코딩에 이용되는 것은 아니기 때문에 불필요한 수신 전력 소모를 야기할 수 있다. 그러므로 IEEE 802.11s 시스템에서 추가적인 기능 구현 없이는 불필요한 수신 전력 소모는 피할 수 없다.

2) 코딩 플로우들의 비대칭 패킷 전송률: 네트워크 코딩에서는 두 개 이상의 패킷이 코딩되어 전송된다. 하지만 만약 코딩 플로우들의 전송률이 서로 다르다면 교차 노드에서 네트워크 코딩 이득이 감소할 수 있다. 예를 들어 플로우 A와 B의 소스에서 패킷 전송률이 각각 2와 4Mbps일 때 교차 노드에서는 2Mbps에 해당하는 패킷들만 네트워크 코딩이 수행되고 나머지 플로우 B의 2Mbps에 해당하는 패킷들은 네트워크 코딩을 수행하지 못하고 불필요한 버퍼링 지연만 발생하게 된다.

3) 교차 노드 비율: 네트워크 코딩 기회를 얻기 위해서는 코딩 구조가 네트워크에 존재해야 한다.

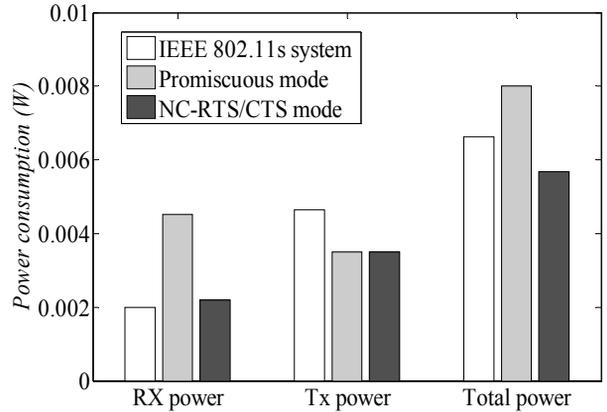


그림 4. 엿들기 모드에 따른 네트워크 전력 소모량

Fig. 4. Power consumption in the network according to the overhearing mode

코딩 구조란 네트워크 코딩을 적용하여 부하량 이득을 얻을 수 있는 특정한 구조를 의미하며 일반적으로 X 구조나 체인 구조 등에서 네트워크 코딩을 적용할 수 있다. 그러므로 얼마나 많은 코딩 구조가 네트워크에 존재하는지 파악하는 것이 네트워크 코딩을 적용하기 위해서는 매우 중요하다. 본 논문에서는 교차 노드 비율을 다음과 같이 정의한다.

$$R_{CN} = \frac{N_{Crossover}}{N_{total}} \quad (1)$$

$N_{Crossover}$ 와  $N_{total}$ 은 각각 네트워크에서 교차노드 수와 전체 노드 수를 의미한다.

## IV. 성능분석

본 장에서는 무선 메쉬 네트워크에서 네트워크 코딩을 적용했을 경우 성능 분석을 수행한다. 3장에서 제시한 3가지 요소들에 대하여 각각 분석해 보며 네트워크 코딩 적용을 위한 고려사항들을 제시한다. 성능 평가에서 모든 플로우의 전송률과 패킷 크기는 고정이며 패킷 전송 반경은 100미터로 설정하였다. 본 논문에서는 네트워크 코딩에 대한 이득을 다음과 같이 나타낸다.

$$G_L = 1 - \frac{L_{NC}}{L_{conv.}} \quad (2)$$

$$G_P = 1 - \frac{P_{NC}}{P_{conv.}} \quad (3)$$

$G_L$ 과  $G_P$ 는 각각 네트워크 부하량과 전력 소비

표 3. 코딩 플로우들의 비대칭 패킷 전송률에 의한 부하량에 대한 네트워크 코딩 이득

Table 3. The NC gain in case of asymmetric flows

$T_2/T_1$	NC gain
0.25	0.1
0.5	0.1667
1	0.25
2	0.1667
4	0.1

표 4. 격자 네트워크에서 네트워크 코딩 이득

Table 4. The network load in the grid network

Type of network	Network load (bits/sec)
IEEE 802.11s system (5x5 grid network)	580608
IEEE 802.11s system with NC (5x5 grid network)	556664
IEEE 802.11s system (7x7 grid network)	1536192
IEEE 802.11s system with NC (7x7 grid network)	1428444

측면에서 네트워크 코딩 이득을 나타내고,  $L_{NC}$ 와  $L_{conv.}$ 은 네트워크 코딩을 적용 하지 않았을 경우와 적용한 경우의 전체 네트워크 부하량을  $P_{NC}$ 와  $P_{conv.}$ 는 마찬가지로 전체 네트워크에서 전력 소비량을 나타낸다.

#### 4.1. 패킷 엿들음 시 전력 소모

엿들음 모드에 따른 전력 소비량을 분석하기 위하여 그림 3과 같은 시뮬레이션 환경을 구성하였다. 시뮬레이션 환경에서는 하나의 네트워크 코딩 노드 집합이 있고, 주변에 네트워크 코딩과 관련 없이 엿들음만 하는 4개의 이웃노드들이 존재한다. 그러므로 만약 promiscuous 모드만 사용한다면 불필요한 패킷 수신 전력 소모가 발생할 수 있다<sup>17)</sup>. 하지만 제안한 NC-RTS/CTS 프로토콜을 사용하면 불필요한 전력소모는 발생하지 않을 것이다. 그림 4는 시뮬레이션 환경에서 발생하는 전력 소모량을 나타낸다. 전력 소모 모델은 표 2와 같다<sup>17)</sup>. promiscuous 모드를 사용했을 경우에  $G_p$ 는 -20.71%이었고, NC-RTS/CTS 프로토콜을 사용했을 경우에는 14.25%였다. 하지만 NC-RTS/CTS를 사용하기 위해서는 기존의 IEEE 802.11s 시스템에서 추가적인 기능을 구현해야 적용 할 수 있다.

#### 4.2. 코딩 플로우들의 비대칭 패킷 전송률

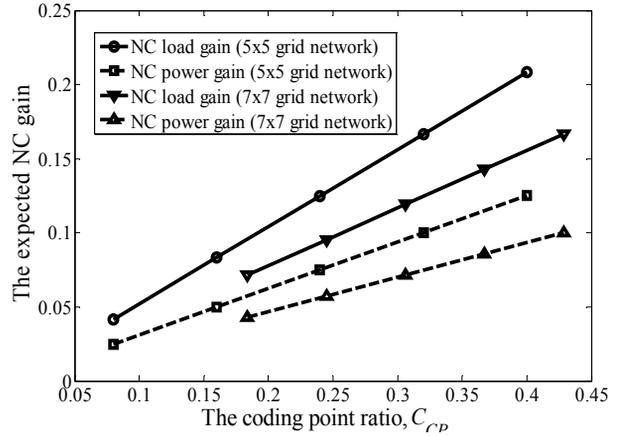


그림 5. 격자 네트워크에서 교차 노드 비율에 따라 예상되는 네트워크 코딩 이득

Fig. 5. Expected NC gain in the grid topology

코딩 플로우들의 비대칭 패킷 전송률에 의해 감소하는 네트워크 코딩 이득을 분석하기 위해서 X 구조의 네트워크에서 플로우 1의 패킷 inter-arrival 시간을  $T_1$ 로 고정하고 플로우 2의 패킷 inter-arrival 시간을  $0.25T_1$ 에서  $4T_1$ 로 변경해가면서 시뮬레이션을 수행하였다. 표 3은  $T_2/T_1$ 의 한 부하량에 대한 네트워크 코딩 이득을 나타낸다.  $T_1$ 과  $T_2$ 는 각각 플로우 1과 2의 패킷 inter-arrival 시간을 나타낸다. 3.2절에서 언급했던 것처럼 각 플로우의 패킷 inter-arrival 시간이 달라서 패킷 전송률이 차이가 나게 되면 부하량에 대한 네트워크 코딩 이득이 감소하는 것을 살펴 볼 수 있다. 그러므로 네트워크 코딩이 적절하게 이용되기 위해서는 네트워크 코딩 응용 시나리오에 대한 연구가 중요하다.

#### 4.3. 교차 노드 비율

본 논문에서는 규모가 큰 네트워크에서 네트워크 코딩의 적용이 얼마만큼의 이득이 있을지 분석하기 위하여 5x5와 7x7 격자 네트워크에서 시뮬레이션을 수행하였다. 각 노드간의 수직, 수평 거리는 50m로 배치하였다. 그리고 모든 노드는 소스 노드로 동작 하면 무작위로 네트워크에 있는 노드를 목적 노드로 선택하게 하였다. 한 개의 교차노드에서 교차되는 코딩 플로우의 수는 2개이다. 표 4는 격자 네트워크에서 네트워크 부하량을 나타낸다.  $G_L$ 은 5x5 (교차노드 2개 발생)와 7x7 격자 네트워크 (교차노드 9개 발생)에서 각각 4%와 7%였다. 이는 하나의 네트워크 코딩 노드 집합에서 얻을 수 있는 이득과

비교하면 그리 크지 않는 이득이라 할 수 있다. 이득이 감소하는 이유는 네트워크에서 코딩 구조가 많이 발생하지 않기 때문이다. 그러므로 본 논문에서는 네트워크 코딩에 의해 얻을 수 있는 이득을 분석하기 위해 앞서 실험과는 달리 무작위로 네트워크에 있는 노드를 목적 노드로 선택하지 않고 라우팅 패스와 목적노드를 분석하고자하는  $R_{CN}$ 에 따라 코딩 구조가 발생하게 수동으로 선택하여  $R_{CN}$ 이 증가함에 따라 발생할 수 있는 네트워크 코딩 예상 이득을 분석해 보았다. 그림 5는 격자 네트워크에서 발생할 수 있는 예상 네트워크 코딩 이득을 나타낸다. x축은  $R_{CN}$ 을 나타내고 y축은 이득을 나타낸다. 예를 들어  $R_{CN}$ 이 40%일 때 5x5 격자 네트워크에서  $G_L$ 과  $G_P$ 는 20%와 12.5%이다. 같은  $R_{CN}$ 일 때 7x7 격자 네트워크가 5x5 격자 네트워크 보다 더 많은 교차노드수를 갖지만 평균 홉 수와 플로우의 수가 네트워크가 커지는 만큼 증가하여 부하량과 오버헤드가 증가하기 때문에 같은  $R_{CN}$ 의 5x5 격자 네트워크 보다 더 낮은 네트워크 코딩 이득을 얻는 것을 살펴 볼 수 있다. 그림 5에서 보는 것과 같이 교차 노드가 충분히 많이 존재한다면 규모가 큰 네트워크에서도 네트워크 코딩 이득이 상당한 것을 살펴 볼 수 있다. 그러므로 규모가 큰 네트워크에서도 네트워크 코딩 이득을 증가하기 위해서는 네트워크 코딩 구조의 수를 증가하는 연구가 필요하다<sup>[7-8]</sup>.

## V. 결 론

본 논문에서는 IEEE 802.11s 기반 메쉬 네트워크에서 네트워크 코딩이 어떻게 이득이 있을지에 대하여 알아보고 네트워크 코딩의 성능을 저하 할 수 있는 다양한 요소들에 대하여 성능 분석을 수행 하였다. 성능 분석 결과, 네트워크 코딩의 이득을 감소시킬 수 있는 요소는 다음과 같다.

1) 네트워크 상태: 네트워크 코딩 되는 플로우들 간 패킷 전송률 불균형이나 적은 수의 네트워크 코딩 구조 같은 네트워크 상태에 따른 네트워크 코딩 이득 감소

2) 네트워크 코딩 오버헤드: 패킷 엇들음을 하기 위해 발생하는 전력소모같이 네트워크 코딩을 수행 하기 위하여 추가적으로 필요한 오버헤드에 의해 발생하는 네트워크 코딩 이득 감소

그러므로 무선 네트워크에서 네트워크 코딩을 적

용하기 위하여 본 논문에서 제시한 요소들을 고려한 다양한 연구가 진행 된다면 네트워크 코딩은 유용한 기술로 발전 할 수 있을 것이다.

## References

- [1] K. H. Lee, J. H. Kim, S. H. Cho “A Performance Analysis of Random Linear Network Coding in Wireless Networks”, *The Journal of Korea Information and Communications Society (J-KICS)*, vol. 35, pp. 830-838, 2011.
- [2] R. Ahlswede, et al., “Network information flow”, *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 46, pp. 1204-1216, 2000.
- [3] S. Y. R. Li, et al., “Linear network coding”, *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 49, pp. 371-381, 2003.
- [4] T. Ho, et al., “A Random Linear Network Coding Approach to Multicast”, *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 52, pp. 4413-4430, 2006.
- [5] L. Jilin, J. C. S. Lui, and C. Dah-Ming, “DCAR: Distributed Coding-Aware Routing in Wireless Networks”, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 9, pp. 596-608, 2010.
- [6] J. K. Sundararajan, D. Shah, M. Medard, S. Jakubczak, M. Mitzenmacher, and J. Barros, “Network Coding Meets TCP: Theory and Implementation”, *Proceedings of the IEEE*, vol. PP, pp. 1-23, 2011.
- [7] P. Parag and J. F. Chamberland, “Queueing Analysis of a Butterfly Network for Comparing Network Coding to Classical Routing”, *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 56, pp. 1890-1908, 2010.
- [8] B. Guo, et al., “Analysis of General Network Coding Conditions and Design of a Free-Ride-Oriented Routing Metric,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 60, no 4. pp. 1714-1727, 2011.
- [9] S. Katti, et al., “XORs in the Air: Practical Wireless Network Coding”, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 16, no 3.

pp. 497-510, 2008.

- [10] L. Jilin, et al., "How Many Packets Can We Encode? - An Analysis of Practical Wireless Network Coding", in *Proc. IEEE INFOCOM 2008.*, pp. 371-375.
- [11] S. Chachulski, et al., "Trading structure for randomness in wireless opportunistic routing", *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, vol. 37, pp. 169-180, 2007.
- [12] R. Koetter and F. R. Kschischang, "Coding for Errors and Erasures in Random Network Coding", *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 54, pp. 3579-3591, 2008.
- [13] S. Zhang, et al., "Physical-layer network coding", in *Proc. the Proceedings of the 12th annual international conference on Mobile computing and networking*, Los Angeles, CA, USA, 2006.
- [14] S. Katti, et al., "Symbol-level network coding for wireless mesh networks", *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, vol. 38, no 1. pp. 401-412, 2008.
- [15] "IEEE Standard for Information Technology-Telecommunications and Information Exchange Between Systems-Local and Metropolitan Area Networks-Specific Requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications", IEEE Std 802.11-2007, pp. C1-1184, 2007.
- [16] "IEEE Draft Standard for Information Technology-Telecommunications and information exchange between systems-Local and metropolitan area networks-Specific requirements-Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications-Amendment 10: Mesh Networking", IEEE P802.11s/D12.0, May 2011, pp. 1-391, 2011.
- [17] L. M. Feeney and M. Nilsson, "Investigating the energy consumption of a wireless network interface in an ad hoc networking environment", in *Proc. IEEE INFOCOM 2001*, vol. 3. no. 1. pp.1548-1557, Apr. 2001

**이 규 환 (Kyu-Hwan Lee)**



2007년 아주대학교 전자공학부 졸업  
 2007년~현재 아주대학교 전자공학과 석/박사 통합과정  
 <관심분야> 네트워크 코딩, WLAN, 무선망 QoS, Ad-hoc, Mesh network 등

**조 성 현 (Sunghyun Cho)**



1995년 2월 한양대학교 컴퓨터공학과 공학사  
 1997년 2월 한양대학교 컴퓨터공학과 공학석사  
 2001년 8월 한양대학교 컴퓨터공학과 공학박사  
 2012년 9월~현재 한양대학교 컴퓨터공학과 부교수  
 2009년 09월~2012년 08월 경상대학교 컴퓨터과학과 조교수  
 2006년 10월~2008년 02월 Stanford University, Postdoctoral Visiting Scholar  
 2001년 9월~2006년 10월 삼성종합기술원 및 삼성 전자 정보통신연구소 전문연구원  
 <관심분야> 차세대 이동통신 시스템, 자동차 통신

**김 재 현 (Jae-Hyun Kim)**



1987년~1996년 한양대학교 전산과 학사 및 석/박사 졸업  
 1997년~1998년 미국UCLA 전기전자과 박사 후 연수  
 1998년~2003년 Bell Labs, Performance Modeling and QoS Management Group, 연구원  
 2003년~현재 아주대학교 전자공학부 정교수  
 <관심분야> 무선인터넷 QoS, MAC 프로토콜, IEEE 802.11/15/16/20, 3GPP, 국방 기술네트워크 등