

# 멀티레이트 멀티홉 무선 네트워크에서 최적화된 멀티패스 네트워크 코딩

박 무 성\*, 윤 원 식<sup>o</sup>

## Optimized Multipath Network Coding in Multirate Multi-Hop Wireless Network

Museong Park\*, Wonsik Yoon<sup>o</sup>

### 요 약

본 논문에서는 인트라세션 네트워크 코딩을 사용하여 멀티레이트 멀티홉 무선 네트워크의 처리율을 향상하기 위한 방법을 제안한다. 멀티레이트는 다양한 전송 속도를 사용하여 전송 속도와 전송 범위에 대하여 다양한 타협점을 가질 수 있어 환경 변화에 따른 성능 변화에 대처할 수 있다. 이러한 멀티레이트 환경에서 인트라세션 네트워크 코딩을 사용할 경우 새로운 전송 속도를 결정하는 방법을 제안한다. 멀티레이트를 사용하는 각 노드에서 인트라세션 네트워크 코딩을 사용하여 유효 전송 속도를 계산하고 가장 높은 유효 전송 속도를 갖는 전송 속도를 선택한다. 선택된 전송 속도를 사용하여 동시 전송 집합을 결정하고 선형계획법을 적용하여 멀티홉 무선 네트워크의 처리율을 계산한다. MATLAB과 lp\_solve IDE 프로그램을 이용하여 두 가지 토폴로지에서 성능 평가를 수행하였으며, 제안한 방식의 처리율이 향상되었다.

**Key Words** : Network Coding, Multirate Multihop Wireless Network, 선형 계획법

### ABSTRACT

In this paper, we propose a method for throughput improvement in multirate multihop wireless networks with intra-session network coding. A multirate transmission supports several rates so that it has a tradeoff between transmission rate and transmission range, therefore multirate can cope with the performance degradation. We present the rate selection method with intra-session network coding in multirate nodes. The effective transmission rate is calculated by using intra-session network coding, and then its maximum effective transmission rate is selected. Concurrent transmission set is determined by selected transmission rate and then the linear programming is formulated for throughput calculation in multihop wireless networks. We evaluate the performance by using MATLAB and lp\_solve programs in two topologies. It is shown that the throughput of the proposed method is improved.

### I. 서 론

멀티홉 무선 네트워크는 상대적으로 저렴한 비용으

로 설치하여 사용할 수 있는 반면에 전송 거리에 따른 신호 세기의 감소, 채널의 불안정성, 간섭 등으로 성능에 영향을 받을 수 있다<sup>1)</sup>. 무선 기기는 높은 전송

※본 연구는 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업(2011-0026736) 지원을 받아 수행되었습니다.

♦ 주저자 : 아주대학교 전자공학과 텔레콤연구실, pmssteve@ajou.ac.kr, 준회원

o 교신저자 : 아주대학교 전자공학과, 텔레콤연구실, wsyoon@ajou.ac.kr, 정회원

논문번호 : KICS2012-04-183, 접수일자 : 2012년 4월 13일, 최종논문접수일자 : 2012년 8월 17일

속도와 긴 전송 반경을 갖기를 원한다. 그러나 동일 전력을 사용할 때 전송 속도와 전송 반경은 트레이드 오프 관계가 있다. 이 때문에 싱글레이트 환경은 두 조건 사이에서 하나의 타협점을 갖는다. 반면에 멀티레이트 환경은 여러 종류의 전송 속도를 가짐으로써 전송 속도 개수만큼의 타협점을 갖게 된다. 따라서 멀티레이트의 여러 타협점 중에서 주어진 상황에 적합한 전송 속도를 선택하는 과정이 필요하다<sup>[2]</sup>. 멀티레이트 전송 속도를 선택하는 다양한 연구가 이루어져 왔다. 네트워크 노드들의 지리적 위치를 이용하여 지역적으로 노드의 유효 전송 속도를 계산하여 전송 속도를 선택하는 방법<sup>[3]</sup>의 연구가 진행되었다. 그러나 이는 기회주의적 라우팅 방식에 한정되어 네트워크 코딩을 사용할 경우 새로운 전송 속도 결정 방식이 요구된다. 또한 전체 네트워크의 상황을 고려하는 알고리즘을 사용하여 처리율 최적화를 위한 방법이 필요하다.

종래의 라우팅 방식은 정보를 전달할 경로를 먼저 설정한 후 전송하는 방식으로 만일 전송이 실패할 경우 새롭게 전송 경로를 다시 설정하여 보낸다. 이는 무선 환경의 특성상 정보의 손실 확률이 높은 상황에서 비효율적인 방식이다. 이러한 점을 개선하기 위하여 채널의 브로드캐스트 특성과 공간적인 다이버시티를 활용하여 정보 손실을 줄일 수 있는 새로운 방법으로 기회주의적 라우팅 방식이 제안되었다. 이 방식은 네트워크상의 전송 경로를 미리 결정하지 않고 각 노드의 전송에서 목적지에 가장 가까운 전송 가능한 노드부터 우선순위를 부여하여 전송한다. 이 과정에서 정해진 수신 노드 이외의 노드 역시 정보를 수신하게 된다. 따라서 이러한 주변의 엷든 노드를 이용하여 전송함으로써 전송 과정의 효율성을 높이고 처리율을 향상시켰다<sup>[4]</sup>. 그러나 이러한 과정에서 여러 개의 노드가 전송하면서 동일한 정보를 불필요하게 중복 전송하는 문제가 발생하였고 전송 스케줄링에 대한 복잡도를 높여 성능 향상과 확장성에 한계를 보였다. 이러한 단점을 개선하기 위하여 동시에 정보를 수신하는 전송 후보 노드의 우선순위에 관계없이 전송하고, 각각의 수신된 정보를 조합하여 독립적인 정보를 전송하도록 하는 멀티패스 네트워크 코딩 방식이 제안되었다<sup>[5,6]</sup>. 이 방식은 기회주의적 라우팅 방식과 랜덤화된 네트워크 코딩이 결합되어 동작하며 목적지 노드에서 디코딩이 이루어질 정도로 충분한 패킷을 받을 때까지 멀티 패스로 패킷이 전송된다. 그리하여 어떤 노드에게 어떤 정보를 보내야 할 지 선택하는 과정이 생략되어 지연 시간이 줄어들고 또한 링크의 이용

을 늘려 처리율의 향상을 가져온다. 그러나 이러한 기법들은 싱글레이트에 국한되어 멀티레이트 환경으로의 확장이 필요하다.

본 논문에서는 인트라세션 네트워크 코딩을 적용하여 멀티홉 무선 네트워크에서 멀티레이트를 이용한 처리율을 최적화하기 위한 방식을 제안한다. 멀티레이트 환경에서 인트라세션 네트워크 코딩을 적용하여 새로운 전송 속도를 결정하기 위한 방법을 제안한다. 멀티레이트를 사용하는 각 노드에서 인트라세션 네트워크 코딩을 사용하여 유효 전송 속도를 계산하고 가장 높은 유효 전송 속도를 갖는 전송 속도를 선택한다. 그리고 동시 전송 집합을 설정하고 선형 계획법을 사용해 소스 노드와 목적지 노드 사이의 처리율을 계산하고 전송 링크를 스케줄링한다. 그 결과로 인트라세션 네트워크 코딩이 적용된 환경에서 멀티레이트의 처리율 변화를 확인한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 멀티레이트의 전송 속도 결정 방법을 제안하고 동시 전송 집합을 설정한 후 처리율 계산을 위한 선형 계획법을 기술한다. III장에서는 구성된 선형 계획법을 두 가지 프로그램을 이용하여 풀고 처리율을 계산해 성능을 평가한다. 마지막으로 IV장에서 결론을 맺는다.

## II. 본 론

### 2.1. 네트워크 환경

$N$ 개의 노드로 이루어진 멀티홉 무선 네트워크에서 각각의 노드는  $L$ 개의 멀티레이트 중에 하나를 선택하여 전송한다. 최초로 정보를 만들어 전송을 시작하는 소스 노드를  $n_s$ , 목적지 노드를  $n_d$ 로 나타낸다. 전송 노드  $n_i$ 가 가질 수 있는 전송 속도를  $R_i^m$ 으로 나타낸다.  $m$ 은 전송 속도를 구분하는 지시변수로  $m = 1, \dots, L$ 이다. 노드  $n_i$ 가 전송 속도  $R_i^m$ 으로 전송할 경우 전송 범위를  $T_i^m$ 로 나타내며, 전송 범위 안에는 여러 개의 주변 노드  $n_j$ 가 존재한다. 전송 범위는 전송 속도에 따라 달라지므로 주변 노드의 개수는 전송 속도에 영향을 받게 된다. 전송 속도가 높아질수록 전송 범위가 짧아지고 주변 노드의 개수도 감소하는 경향을 보인다. 전송 속도  $R_i^m$ 로 전송하는 노드  $n_i$ 가 주변 노드  $n_j$  사이에서 형성하는 링크의 길이를  $d_{ij}$ 로 나타내며, 링크

의 전달 확률은  $p_{ij}^m$ 로 나타낸다.

### 2.2. 네트워크 코딩 방법

본 논문에서는 무선 네트워크의 처리율을 향상시키기 위하여 네트워크 코딩 방식을 적용하였다. 네트워크 코딩은 수신한 서로 다른 패킷을 조합하여 독립적인 정보를 생성해 전송하는 방식으로 네트워크의 전체적인 처리율의 향상을 가져오는 방식이다<sup>[7]</sup>. 이 중에 인트라세션 네트워크 코딩 방식은 동일한 소스 노드와 목적지 노드를 갖는 한 세션내에서 네트워크 코딩을 적용하는 방식이다. 전송 노드의 전송 범위내에 있는 주변 노드들 중에서 목적지 노드와의 거리가 전송 노드에 비해 가까운 노드들을 전송 후보 노드라 하며, 전송 노드  $n_i$ 의 전송 후보 노드를  $F_i^m = \{n_{i_1}, \dots, n_{i_q}\}$ 로 나타낸다. 인트라세션 네트워크 코딩은 전송 노드가 여러 전송 후보 노드들에게 동시에 전송한다. 따라서 이 기법은 하나의 세션에서 정보가 전달되는 경로를 미리 결정하여 전송하고 실패할 경우에 재전송하는 기존의 라우팅 방식에 비해 링크 이용의 효율성이 좋다. 또한 정보를 받는 수신 노드들에 우선순위를 부여하여 전송하는 기회주의적 라우팅 방식과 비교하여 수신 노드에서 전송의 우선순위를 결정할 필요가 없기 때문에 스케줄링이 간단하고 링크의 대기 시간이 감소한다. 그러므로 네트워크 코딩 방식은 네트워크 전반적인 링크의 사용량을 개선하여 소스와 목적지 사이의 처리율을 증가시킬 수 있는 방법이다. 전송 노드  $n_i$ 와 전송 후보 노드 집합  $F_i^m$  사이에서 발생하는 링크들은  $l_{ii_1}^m, \dots, l_{ii_q}^m$ 로 나타내며 각각 전달 확률로  $p_{ii_1}^m, \dots, p_{ii_q}^m$ 을 갖게 된다.

### 2.3. 전송 속도 선택 방법

무선 네트워크 환경은 여러 가지 제약 조건 때문에 처리율에 한계를 갖는다. 무선 채널의 특성으로 인하여 높은 전송 속도는 전송 반경의 급격한 하락을 가져오며, 주변 환경의 변화에 민감하여 쉽게 성능이 악화된다. 이러한 특성을 극복하고 네트워크의 안정적인 성능을 보장하기 위하여 멀티레이트를 사용한다. 싱글레이트 환경에서는 항상 동일한 전송 속도를 갖기 때문에 전송 채널이 악화될 경우, 링크의 전달 확률이 작아져 처리율이 하락할 수 있다. 반면 멀티레이트는 동일한 상황에서 전송 속도를 변화시킴으로써 변화에 대처할 수 있다. 전송 속도를 선택하는 것은 상황의 변화에 대처하는 효율적인 방법을 찾는 과정으로 볼 수 있고 따라서 적절한 전송

속도의 선택이 필요하다.

소스 노드에서 생성된 정보는 여러 전송 노드들을 거쳐 목적지 노드에 도달한다. 각각의 노드는 현재 위치와 전송 범위 내의 주변 노드의 위치를 파악하고 있다. 이러한 위치 정보는 소스 노드를 포함한 모든 전송 노드가 목적지 노드에 도달하기 위해 필요한 유효 전송 속도를 계산하는데 이용된다. 유효 전송 속도를 계산하기 위해서는 멀티레이트  $R_i^m (m = 1, \dots, L)$ 와 전송 속도별 링크의 전달 확률  $p_{ij}^m$ 을 이용하고 주변 노드 중에 전송 후보 노드 집합  $F_i^m$ 의 노드들을 대상으로 한다. 유효 전송 속도의 수식은 다음과 같이 나타낸다.

$$D_i^m = \sum_{n_j \in F_i^m} (R_i^m p_{ij}^m + R_i^m p_{ij}^m D_j) \quad (1)$$

유효 전송 속도를 구하여 전송 속도를 선택하는 과정을 표 1에 기술하였다. 각각의 전송 노드는 네트워크 코딩 방식을 통해 선택되는 전송 후보 노드  $F_i^m$ 의 상태를 고려해야하고, 이를 위하여 전송 후보 노드의 유효 전송 속도를 사용한다. 목적지 노드는 이웃한 전송 노드에 의해 항상 전송 후보 노드로 지정된다. 또한 이 전송 노드들은 목적지와 멀리 떨어진 이웃 노드에 의해 전송 후보 노드로 지정되고, 이러한 과정은 소스 노드에서까지 반복된다. 결국 목적지에 가까운 노드부터 유효 전송 속도가 먼저 결정되고 전송 속도를 선택하게 되며 현재 노드가 가질 수 있는 최대의 유효 전송 속도가 다음 노드의 유효 전송 속도 계산 조건인  $D_j$ 가 된다. 따라서 모든 노드가 전체 네트워크의 효율성을 고려하여 전송 속도를 선택하게 되고 전체적인 성능 향상을 가져올 수 있다.

### 2.4. 동시 전송 집합 선택

멀티홉 무선 네트워크의 노드는 브로드캐스트 방식으로 전송한다. 따라서 전송 노드와 이웃한 노드로 동시에 링크가 생성되어 정보가 전달된다. 전송하는 동안에 전송 노드는 수신 링크를 가질 수 없다. 또한 수신 노드는 어떤 경우에도 둘 이상의 전송 노드를 통해 동시에 수신할 수 없다. 동시 전송 집합은 이러한 조건을 만족하는 노드들의 집합으로 이루어지며 각각의 전송 노드가 서로 다른 전송 후보 노드를 갖게 된다. 네트워크상의 노드들의 집합을  $V$ 로 설정하고 식 (2)와 같이 나타낸다. 또한 전송노

표 1. 유효 전송 속도 계산 및 전송 속도 선택 과정  
Table 1. Effective transmission rate calculation and rate selection method

<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Set Effective Transmission Rate (ETR) of all nodes to zero.</li> <li>2. From the nearest node to the destination node, calculate <math>D_i^m</math> for multirate <math>R_i^m(m=1, \dots, L)</math> by using (1).</li> <li>3. The largest value of <math>D_i^m(m=1, \dots, L)</math> is ETR of node <math>i</math> and then choose <math>R_i^m</math> of the maximum ETR as the data rate of node <math>i</math>.</li> <li>4. Go to step 1 and iterate this process until the source node find the data rate.</li> </ol>
--

드와 전송 후보 노드 사이에서 만들어지는 링크들의 집합을  $E$ 로 설정하고 식 (3)과 같이 나타낸다.

$$V = \{n_i | i = 1, \dots, N\} \quad (2)$$

$$E = \{l_{ij}^m | i = 1, \dots, N, m = 1, \dots, L, n_j \in F_i^m\} \quad (3)$$

동시 전송 집합을 구성하기 위한 조건들을 수식적으로 표현하기 위한 과정을 다음과 같이 나타낼 수 있다. 각각의 동시 전송 집합을  $CT_\alpha$ 로 설정하고 지시 변수  $\alpha$ 를 통해 각각의 동시 전송 집합을 구분한다.  $X_{ij}^{m\alpha}$ 는 동시 전송 집합에서의 링크  $l_{ij}^m$ 의 이용 여부를 나타내는 지시변수로 식 (4)에 나타나있다.  $\epsilon_i^{m\alpha}$ 는 동시 전송 집합에서 노드  $n_i$ 의 이용 여부를 나타내는 지시변수로 식 (5)와 같이 나타낸다.

$$X_{ij}^{m\alpha} = \begin{cases} 1, l_{ij}^m \text{ is usable in } CT_\alpha \\ 0, \text{ otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

$$\epsilon_i^{m\alpha} = \begin{cases} 1, n_i \text{ is usable in } CT_\alpha \\ 0, \text{ otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

식 (4)에서  $X_{ij}^{m\alpha}$ 가 1이 되는 경우는 전송 속도  $R_i^m$ 로 노드  $n_i$ 와  $n_j$  사이에서 발생한 링크가 동시 전송 집합  $CT_\alpha$ 에서 이용되는 경우이다. 또한 식 (5)에서  $\epsilon_i^{m\alpha}$ 가 1인 경우는 노드  $n_i$ 가 동시 전송 집합  $CT_\alpha$ 에서 전송 노드 또는 수신 노드로 선택되었다는 것을 의미한다. 그리하여 동시 전송 집합  $CT_\alpha$ 에서의 전송 노드와 수신 노드를 식 (6)과 같이 표현할 수 있다. 식 (7)은 링크 사용에 따라 각 노드가 갖는 조건을 나타낸 것으로 전송 링크 또는 수신 링크를 갖게 되면 그 노드는  $CT_\alpha$ 에 포함되어 이용되

는 것을 나타낸다.

$$(n_i, \{n_j | l_{ij}^m \in E, X_{ij}^{m\alpha} = 1\}) \quad (6)$$

$$\epsilon_i^{m\alpha} = \min \left( 1, \sum_{l_{ij}^m \in E} X_{ij}^{m\alpha} + \sum_{l_{ji}^m \in E} X_{ji}^{m\alpha} \right) \quad (7)$$

동일한 동시 전송 집합에 포함된 서로 다른 전송 노드는 각각 서로 다른 전송 후보 노드들을 갖도록 선택되어야 한다. 이러한 조건은 식 (8)에 나타나 있다. 여기서  $I$ 는 링크의 간섭 관계를 판별하는 지시 변수로 값이 1이면 두 링크가 동시에 전송할 수 있으며 0이면 동시에 전송할 수 없다. 동일 전송 집합하의 링크들은 서로 간섭하지 않거나 동일한 전송 노드에서 생성된 것을 나타낸다. 링크가 서로 간섭하지 않기 위해서는 각 링크의 수신 노드가 동시 전송하는 다른 노드의 전송 범위에 포함되지 않아야 한다. 따라서 링크 간에 간섭이 있는 경우 동시 전송을 할 수 없음을 식 (9)에 나타내었다. 지시변수  $I$ 가 0이 되면  $X_{ij}^{m_1\alpha} + X_{pq}^{m_2\alpha} \leq 1$ 이 되므로 링크  $l_{ij}^{m_1\alpha}$ 와  $l_{pq}^{m_2\alpha}$ 는 동시에 발생할 수 없다.

$$I(l_{ij}^{m_1\alpha}, l_{pq}^{m_2\alpha}) = \begin{cases} 1, i = p \text{ or } l_{ij}^{m_1} \text{ and } l_{pq}^{m_2} \\ \text{do not interfere} \\ 0, \text{ otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

$\forall m_1, m_2 = 1, \dots, L, \alpha = 1, \dots, M$

$$X_{ij}^{m_1\alpha} + X_{pq}^{m_2\alpha} \leq 1 + I(l_{ij}^{m_1}, l_{pq}^{m_2}), \quad (9)$$

$\forall m_1, m_2 = 1, \dots, L, \alpha = 1, \dots, M$

### 2.5. 선형 계획법

무선 네트워크 환경에서 설정된 동시 전송 집합  $CT_\alpha$ 는 총  $M$ 개가 존재하며  $\alpha = 1, \dots, M$ 으로 나타낸다. 각각의 동시 전송 집합은  $\lambda_\alpha$ 의 시간 비율로 전송을 하게 된다. 이로써 네트워크의 중단 간 처리율 계산 문제를 동시 전송 집합의 시간 스케줄링 문제로 바꾸어 볼 수 있게 된다. 또한 어떠한 상황에서도 두 개 이상의 동시 전송 집합들이 동시에 전송할 수 없으므로, 각각의 시간 비율의 총합은 1을 넘을 수 없다.

멀티홉 무선 네트워크의 처리율 계산을 위해 널리 사용되고 있는 선형 계획법<sup>[4,8]</sup>을 사용하여 최적화 문제를 설정하고 해를 구하는 과정을 통해 이루어질 수 있

다. 선형 계획법은 목적 함수와 여러 제약식을 통해 네트워크 환경을 수식적으로 모델링하고 이를 다양한 방법으로 풀어 최적화된 네트워크의 처리율을 계산하기 위하여 사용된다. 네트워크의 처리율  $\gamma$ 를 최대화시키기 위한 함수를 목적 함수로 설정하고 각 링크에 인가된 플로우 레이트에 대한 제약식을 설정한다. 또한 네트워크 코딩을 기반으로 조건식을 세우고 동시 전송 집합의 제약식을 설정한다. 다음의 수식들은 최대 처리율을 구하는 선형 계획법을 나타낸다.

$$\max \gamma \quad (10)$$

subject to :

$$\sum_{l_{ij}^{m_1} \in E} x_{ij}^{m_1} - \sum_{l_{ji}^{m_2} \in E} x_{ji}^{m_2} = 0, \quad (11)$$

$$n_i \neq n_s, n_i \neq n_d, \forall m_1, m_2 = 1, \dots, L$$

$$\sum_{l_{sj}^m} x_{sj}^m = \gamma, \quad \forall m = 1, \dots, L \quad (12)$$

$$\sum_{l_{jd}^m} x_{jd}^m = -\gamma, \quad \forall m = 1, \dots, L \quad (13)$$

$$x_{ij}^{m\alpha} \geq 0, l_{ij}^m \in E, \quad (14)$$

$$\forall m = 1, \dots, L, \alpha = 1, \dots, M$$

$$\sum_{\alpha=1}^M \lambda_{\alpha} \leq 1 \quad (15)$$

$$\lambda_{\alpha} \geq 0, \alpha = 1, \dots, M \quad (16)$$

$$x_{ij}^{m\alpha} \leq \lambda_{\alpha} R_{ij}^m P_{ij}^m, l_{ij}^m \in E, \quad (17)$$

$$\forall m = 1, \dots, L, \alpha = 1, \dots, M$$

식 (11)은 한 노드에서 전송 링크와 수신 링크가 갖는 플로우 레이트의 합은 0이 된다는 것을 나타내며, 이는 소스 노드와 목적지 노드를 제외한 네트워크상의 모든 노드에서 갖는 조건임을 나타내고 있다.  $x_{ij}^{m_1}, x_{ji}^{m_2}$ 는 링크의 플로우 레이트를 나타내는 변수이다. 식 (12)는 소스 노드에서 전송된 링크의 플로우 레이트의 합이 네트워크 전체의 처리율과 같음을 나타낸다. 또한 이것은 소스 노드에서 생성된 독립적인 패킷의 수와 일치한다. 이와 반대로, 식 (13)은 목적지 노드에서 수신된 링크의 플로우 레이트 합이 네트워크 전체 처리율과 동일하며 전송을 양의 값으로 가정할 때 목적지 노드에서 수신하는 플로우 레이트의 합은  $-\gamma$ 가됨을 나타낸다. 식

(11)~(13)을 통하여 네트워크상의 플로우를 보존되며 손실이 없는 네트워크임을 의미하고 모든 패킷이 목적지 노드로 전달됨을 의미한다. 식 (14)는 링크의 플로우 레이트에 대한 조건으로, 항상 0보다 크거나 같은 값을 가짐을 보여준다. 식 (15)와 (16)은 동시 전송 집합의 스케줄링에 대한 수식이다. 식 (15)는 모든 동시 전송 집합에 할당된 시간 비율을 더하면 1을 넘지 않는 조건을 나타낸다. 식 (16)은 각각의 동시 전송 집합에 할당된 시간 비율이 항상 0보다 크거나 같음을 보여준다. 식 (17)은 링크의 플로우 레이트를 결정하는 수식으로 각각의 링크가 가질 수 있는 최대의 플로우 레이트를 동시 전송 집합의 시간 비율과 링크의 전송 확률을 통해 나타내었다. 식 (10)~(17)을 통해 멀티홉 무선 네트워크의 처리율을 계산하는 선형 계획법을 나타내었고, 이를 동시 전송 집합의 스케줄링 문제로 나타냄으로써 최대 처리율을 구할 수 있다. 이상의 내용을 살펴보면 네트워크를 모델화하고 인트라세션 네트워크 코딩 기법을 활용하여 유효 전송 속도를 결정하고 전송 속도를 최적화하였다. 또한 브로드캐스트 환경을 활용하여 노드 기반의 동시 전송 집합을 설정하고 선형 계획법을 사용하여 멀티레이트 무선 멀티홉 네트워크의 스케줄링 및 최대 처리율을 계산 과정을 수행하였다.

### III. 성능 평가

본 장에서는 성능 평가 결과를 기술한다. 멀티홉 무선 네트워크에서 인트라세션 네트워크 코딩을 통하여 싱글레이트 전송과 멀티레이트 전송의 처리율을 비교한다. 멀티레이트 전송에 있어서 전송 속도의 선택 과정은 본 논문에서 제한한 방법을 사용하였다. 각각의 노드는 싱글 채널, 싱글 라디오 환경으로 가정하였다. 성능 평가는 두 가지 환경에서 수행하였다. 첫째로  $5 \times 5$ , 총 25개의 노드로 구성된 그리드 토폴로지에서의 전송 속도 R, 1.5R, 2R에 대하여 각각의 싱글레이트의 처리율과 멀티레이트의 처리율을 계산하여 비교하였다. 두 번째는 50units  $\times$  50units로 구성된 영역에 35개의 노드를 무작위로 배치한 랜덤 토폴로지에서의 전송 속도 R, 1.5R, 2R에 대하여 그리드 토폴로지에서의와 같이 싱글레이트와 멀티레이트의 처리율을 계산하여 비교하였다. 두 가지 환경 모두 토폴로지의 가장 왼쪽 하단의 노드를 소스 노드로 설정하고, 가장 오른쪽 상단의 노드를 목적지 노드로 정하였다. 전송 속도에 따라서

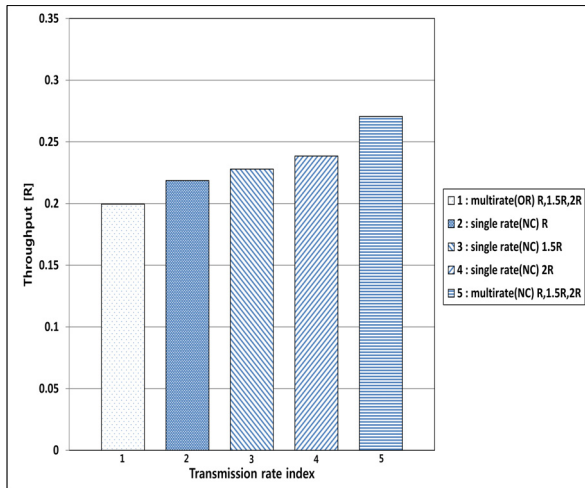


그림 1. 그리드 토폴로지에서 처리율  
Fig. 1. Throughput in a grid topology

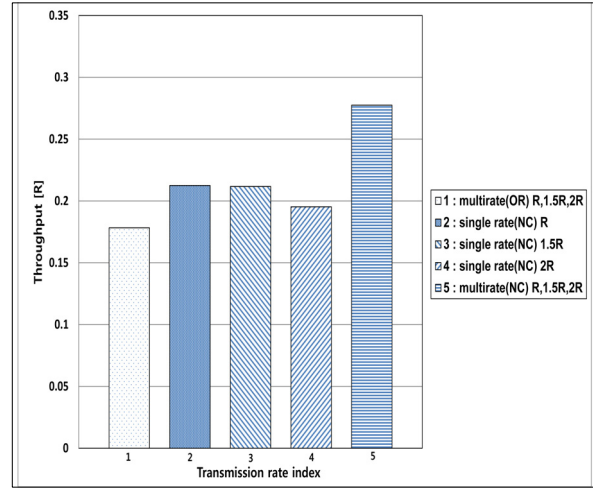


그림 2. 랜덤 토폴로지에서 처리율  
Fig. 2. Throughput in a random topology

전송 범위가 결정되었고, 간섭 범위는 전송 범위와 같다고 가정하였다. 처리율 계산을 위해서 MATLAB과 lp\_solve IDE 프로그램을 사용하였다.

그리드 토폴로지의 경우 성능 평가 결과는 그림 1과 같다. 멀티레이트 환경에서 기회주의적 라우팅 방식을 사용하는 경우 네트워크 코딩 방식을 사용할 경우보다 낮은 처리율을 보였다. 또한 멀티레이트 환경에서 제안한 네트워크 코딩 방식을 사용할 경우 싱글 레이트 환경에서보다 높은 처리율을 가짐을 확인할 수 있다. 랜덤 토폴로지에서도 동일한 과정의 계산을 수행하였다. 그 결과는 그림 2에 나타냈으며, 그림 1과 마찬가지로 본 연구에서 제안한 방식을 사용한 경우 기회주의적 라우팅 방식과 싱글레이트에 비하여 처리율이 향상됨을 알 수 있다.

두 가지 환경에서의 처리율 그래프를 통해 멀티홉 무선 네트워크 환경에서 멀티레이트의 이용은 싱글 레이트 상황에 비하여 처리율을 향상시킬 수 있는 방법임을 보여 주고 있다. 또한 동일하게 멀티레이트를 사용한 경우에는 인트라세션 네트워크 코딩 방식을 사용한 경우에 기회주의적 라우팅 방식보다 높은 처리율을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 각각의 노드는 세 가지의 전송 속도 중에서 한 가지를 선택하였고 전송 범위도 동시에 결정되었다. 이는 다양한 전송 속도를 이용하여 전송 속도와 전송 반경의 타협점을 여러 개 갖는 것의 장점으로 나타나며 싱글 레이트 환경에 비하여 높은 처리율을 가지게 된다. 따라서 본 논문에서 제안한 멀티레이트 전송 속도 결정 방식은 인트라세션 네트워크 코딩과 결합하여 처리율 최적화에 효율적인 방법임을 보여 준다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 인트라세션 네트워크 코딩을 사용하여 멀티레이트 멀티홉 무선 네트워크의 처리율을 향상하기 위한 방법을 제안하였다. 멀티레이트를 사용하는 각 노드에서 인트라세션 네트워크 코딩을 사용하여 유효 전송 속도를 계산하고 가장 높은 유효 전송 속도를 갖는 전송 속도를 선택한다. 이렇게 결정된 전송 속도를 통해 각 노드의 동시 전송 집합을 설정하고 선형계획법을 통해 멀티레이트 멀티홉 무선 네트워크의 처리율을 도출하였다. 두 가지 토폴로지에서 성능을 평가한 결과, 새롭게 제안한 멀티레이트 전송방법은 싱글레이트 전송방법에 비하여 높은 처리율을 나타내었다. 따라서 본 논문의 연구는 인트라세션 네트워크 코딩을 통해 멀티레이트 멀티홉 무선 네트워크의 성능 향상에 기여할 수 있다.

#### References

- [1] K. Jain, J. Padhye, V. N. Padmanabhan, and L. Qiu, "Impact of interference on multi-hop wireless network performance," *Wireless Networks*, vol. 11, no. 4, pp. 471-487, Jul. 2005.
- [2] B. Awerbuch, D. Holer, and H. Rubens, "High Throughput Route Selection in Multi-Rate Ad Hoc Wireless Networks," *Proc. Conf. Wireless On-Demand Network Systems (WONS)*, pp. 251-269, Mar. 2004.
- [3] K. Zeng, W. Lou, and H. Zhai, "Capacity of opportunistic routing in multi-rate and

multi-hop wireless networks,” *IEEE Trans. Wireless Comm.*, vol. 7, no. 12, pp. 5118 - 5128, Dec. 2008.

[4] S. Biswas, and R. Morris, “ExOR : Opportunistic Multi-Hop Routing for Wireless Networks,” *ACM SIGCOMM*, pp. 133-143, Aug. 2005.

[5] S. Chachulski, M. Jennings, S. Katti, and D. Katabi, “Trading structure for randomness in wireless opportunistic routing,” in *Proc. of ACM SIGCOMM 2007*, pp. 168-180, Aug. 2007.

[6] X. Zhang, and B. Li, “Optimized multipath network coding in lossy wireless networks,” *IEEE J. Sel. Areas Comm.*, vol. 27, no. 5, pp. 622-634, Jun. 2009.

[7] C. Fragouli, D. Katabi, A. Markopoulou, M. Medard, and H. Hariharan, “Wireless network coding: opportunities & challenges,” *IEEE military comm. conference (MILCOM'07)*, Orlando, FL, pp. 1-8, Oct. 2007.

[8] H. Su, and X. Zhang, “Modeling throughput gain of network coding in multi-channel multi-radio wireless ad hoc networks,” *IEEE J. Sel. Areas Comm.*, vol. 27, no. 5, pp. 593-605, Jun. 2009.

**박 무 성 (Museong Park)**



2011년 2월 아주대학교 전자공학과 졸업  
2011년~현재 아주대학교 전자공학과 석사과정  
<관심분야> 무선네트워크, 이동통신

**윤 원 식 (Wonsik Yoon)**



1984년 서울대학교 제어계측공학과 (학사)  
1986년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (석사)  
1991년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (박사)  
1991년 금성전기 선임연구원  
1994년 LG정밀 책임연구원  
1995년 University of Victoria 방문교수  
2001년 콘텔라 CTO  
2007년 University of Florida 방문교수  
1994년~현재 아주대학교 전자공학과 교수  
<관심분야> 이동통신, 무선네트워크