

# 무선 통신 네트워크에서 네트워크 코딩과 계층간 최적화

김성륜 | 황 준

연세대학교

## 요약

본 논문에서는 네트워크 코딩 기법이 무선 통신 네트워크에서 적용되는 과정에서 발생하는 여러 특이점과 계층간 최적화 (Cross-layer Optimization) 문제를 소개한다. 또한 이의 해결을 통해서 얻어지는 네트워크 코딩 이득 (Network Coding Gain)의 몇가지 측면을 소개한다

## 1. 서론

통신 네트워크의 효율은  $N$ 개의 Source 노드에서  $M$ 개 Destination노드로 정보를 빠른 속도로 전송하는 것으로 측정된다. 이와 같은 통신 네트워크의 효율은 물리 계층 (Physical layer)의 변복조 및 코딩 기법, 효율적인 MAC (Media Access Control) 설계, 라우팅 기법, 그리고 전송 계층 (Transport Layer)의 효율적인 혼잡 제어 및 통신 오류 복구 등, 통신 계층 각각의 여러 기법들의 최적화된 설계에 의해서 실현된다.

네트워크 코딩 (Network Coding)은 그 이름이 의미하는 바와 같이, 네트워크 계층에서 이루어지는 코딩 기법을 이야기하는 것으로, 통신 자원을 효율적으로 사용하여 통신 네트워크의 전송 속도를 향상시키고자 하는 것에 그 목적을 두고 있다. 네트워크 코딩은 본질은 정보의 압축이며, 이 압축이 통신 네트워크의 라우팅과 밀접하게 연관되어 있다. 특히 정보 압축의 해제, 즉 디코딩의 절차는 통신 네트워크

의 여러 경로로부터 오는 정보를 협력적으로 (Cooperative) 활용하는 것을 근간으로 하고 있다. 따라서 네트워크 코딩의 목적은 소스 코딩 (Source Coding), 채널 코딩 (Channel Coding)등 물리 계층에서 사용되는 코딩 기법과는 차이가 있다.

네트워크 코딩은 최초 멀티캐스트 유선 상황에 적용하기 위해 고안되었으나 [1], 최근 연구 결과 무선 상황에서도 구현 가능성이 확인되고 실증적으로 증명되었다 [2].

무선 통신 네트워크의 경우 전송 미디어 자체의 특성상 송신기의 정보가 동시에 여러 수신기에 전달되게 된다. 이는 여러 수신기로 하여금 일종의 엿들음 (Overhearing)을 가능케하여, 이를 활용한 네트워크 코딩의 적용이 자연스럽게 예상되고 있다. 최근에는 이론적 및 실증적으로 네트워크 코딩이 적용된 무선 네트워크의 용량이 어느 정도 증대했는지를, 네트워크 코딩 이득 (Network Coding Gain)이라는 측면에서 분석하는 연구가 활발하게 진행되고 있다 ([2], [3] 및 해당 논문의 참고 문헌 참조).

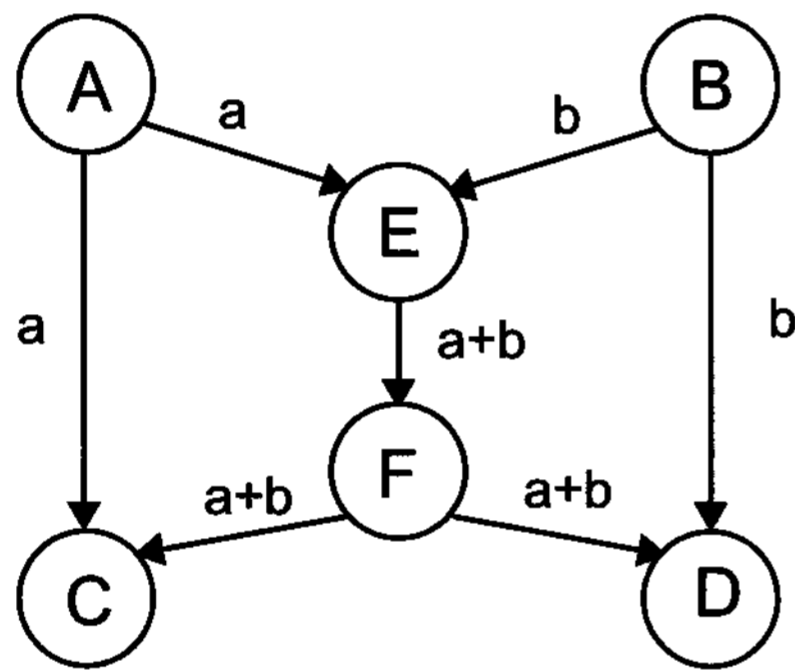
네트워크 코딩은 통신 네트워크에서 중계 역할을 담당하는 노드에서 이루어지는 것으로, Source 노드에서 Destination노드까지 다중홉 (Multihop)으로 전송되는 네트워크에서 적용된다. 따라서 다중홉 통신이 활발하게 연구되고 있는 무선 통신 네트워크에서 그 활용도는 높다고 하겠다.

그렇지만, 네트워크 코딩이 무선 네트워크에 적용되기 위해서는 극복해야 할 문제들이 존재하기도 한다. 이는 다중홉 무선 통신이 가지는 일반적인 문제를 포함하여, 네트워크 코딩만이 갖는 고유한 제약을 의미하는 것으로, 실용화

단계까지는 아직도 많은 연구자들의 노력이 요구된다고 할 수 있다.

본 논문에서는 네트워크 코딩 기법이 무선 통신 네트워크에서 적용되는 과정에서 발생하는 여러 계층간 최적화 (Cross-layer Optimization) 문제, 그리고 이 문제의 해결을 통한 네트워크 코딩 이득의 몇가지 측면을 살펴보고자 한다.

이를 위해서 다음 장에서는 네트워크 코딩 기법의 간단한 소개와 이의 무선 네트워크에 적용되었을 때의 특이점을 살펴보고자 한다. 그리고 제 3장과 4장에서는 네트워크 코딩 기법과 관련된 여러 계층간 최적화 문제를 소개하도록 한다.



(그림 1) Butterfly Network

## II. 네트워크 코딩

네트워크 코딩은 (그림 1)과 같은 나비 모양의 멀티캐스트 유선 네트워크를 가지고 가장 쉽게 설명되고 있다 [1]. (그림 1)에서 두개의 Source 노드 A와 B는 각각 a와 b라는 정보 (심볼)을 C와 D destination노드에 전달하고자 한다. 이때 C와 D는 a와 b를 모두 전달받아야 한다. 설명의 편의를 위해서 위 네트워크가 일종의 슬롯을 기반으로 정보를 전송한다고 가정하자. 즉, 먼저 첫번째 통신 슬롯에서 A노드는 a라는 정보를 C노드와 E노드에 동시에 전송한다. 그 다음 슬롯에서 B노드는 b라는 정보를 D노드와 E노드에 동시에 전송한

다. 세번째 슬롯에서 E노드는 a와 b 정보를 결합하게 된다. 이때 선형 코딩 기법 (Linear Coding)을 사용하게 되는데, 가장 많이 활용되는 것은, a와 b 정보의 bitwise eXclusive OR (XOR)을 거쳐서 일종의 압축을 하게는 과정이다. 세번째 슬롯에서 E노드는 F노드로 XOR 코딩된 정보를 전송한다. 이때, F노드는 코딩된 정보를 C와 D destination노드에 전달하게 된다. 이때 C와 D 노드는 첫번째 슬롯에서 전송된 a와 b 정보를 보관하고 있다가, F노드에 의해서 전달된 코딩된 정보에 각각 a와 b를 XOR함으로써 보관하고 있지 않았던 새로운 정보 b와 a를 각각 받게 된다.

이 과정을 살펴보면 a와 b라는 정보가 C와 D에 도착하기 까지 네개의 슬롯을 거치게 되어 있는 것에 반해서, 만약 네트워크 코딩을 사용하지 않았다면, E노드는 F노드에서 각각 한 슬롯씩이 추가로 발생하여, 총 여섯개의 슬롯이 필요하다는 것을 알 수 있다.

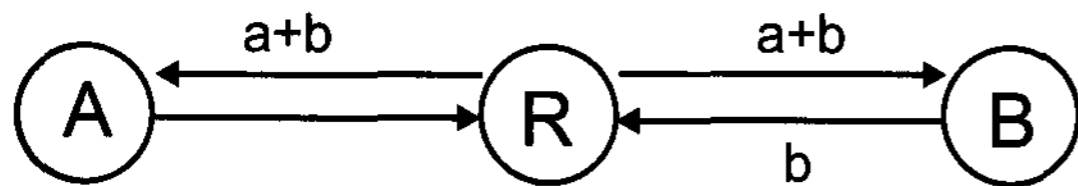
[1]의 연구에 의해서 촉발된 네트워크 코딩은 N개의 Source 노드에서 M개 Destination노드로 정보를 전달하는 일반적인 통신 네트워크에서 적용을 생각할 수 있다. 이후 연구에서는, 예를 들어, 멀티캐스트 네트워크에서 선형 코딩을 기반으로 한 네트워크 코딩을 적용하면, 이론적으로 최적의 네트워크 효율을 얻을 수 있다는 결과를 보여주고 있다 [4].

일견 효율적으로 판단되는 네트워크 코딩은 그 자체적으로 어려운 문제 역시 포함하고 있다. (그림 1)과 같은 단순한 네트워크가 아닌 일반적인 토폴로지를 갖는 네트워크에서 어느 링크에서 네트워크 코딩이 이루어지는 것이 최적이나 의 문제는 상당히 복잡하다.

이와 밀접하게 관련되어 선형 코드로 코딩된 정보를 받은 노드의 경우, 이를 디코딩하기 위해서는 받고자 하는 정보를 제외한 나머지 정보를 가지고 있어야 하는데, 이를 보장하는 것 역시 어려운 문제이다. 이 문제는 무선의 경우 매우 독특하게 나타나는데, 예를 들어 (그림 1)에서 C와 D노드가 A와 B노드로부터 비교적 멀리 떨어져 있다면, C와 D노드는 첫번째 슬롯에서 정보 a와 b를 정상적으로 받지 못하게 된다. 이와 같은 상황에서는 F로부터 코딩된 정보를 받게 되더라도 이를 디코딩할 수 없게 된다. 이와 같은 단순한 예에서도 존재하는 일종의 "Overhearing 문제"는 일반적인 무선 네트워크에서 어느 링크에서 어느 정보를 결합하여 네트워

크 코딩을 적용하고, 이 코딩된 정보를 어느 노드에 전달해야 하는지의 여부와 연관되어 매우 복잡한 문제가 된다.

네트워크 코딩은 수신 노드에서, 전달받은 코딩된 정보를 얼마나 성공적으로 디코딩할 수 있는지 여부에 따라 그 효율성이 좌우된다. 성공적 디코딩을 위해서는 각 노드마다 디코딩을 위한 정보를 필수적으로 사전에 가지고 있어야 가능하다. 그러나, 여러 노드의 복잡한 배치로 이루어진 일반적인 네트워크에서는, 디코딩하기 위한 다른 노드 정보에 대한 인식이 가능하지 않아, 네트워크 코딩의 성능을 저하시키는 요인으로 작용한다.



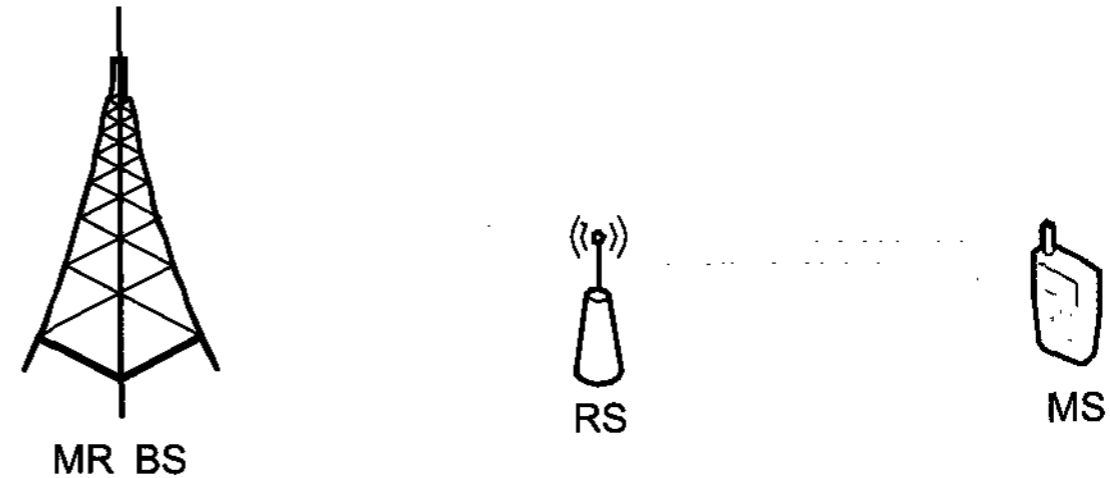
(그림 2) 양방향 선형 네트워크

그러나 (그림 2)와 같이 선형으로 구성된 네트워크에서 양쪽 끝에 존재하는 두개의 노드가 상호 정보 교환을 중간의 중계 노드를 활용하여 한다면, 네트워크 코딩의 적용이 비교적 용이하게 이루어질 수 있다. 즉 중간의 중계 노드는 왼쪽과 오른쪽의 노드로부터 받은 정보를 인코딩하여 (XOR), 코딩된 정보를 양쪽 노드로 전송한다. 이때 코딩된 정보를 받은 양쪽 노드는, 이미 자신이 보낸 정보를 보관하고 있다가, 이를 코딩된 정보의 디코딩에 활용한다. 이 경우 앞의 (그림 1)에서 언급되었던 일종의 Overhearing 문제는 존재하지 않게 된다.

여기서 우리는 다음의 몇가지 의문점을 갖게 된다. 위와 같이 선형으로 구성된 네트워크가 다중홉 무선 네트워크일 경우, 이와 같은 예가 흔히 존재하는 것인지? 또한 선형 다중홉 무선 네트워크의 모든 중계 노드에서 네트워크 코딩을 적용하여, 주파수 자원을 효율적으로 사용한다면, End-to-end throughput은 얼마나 향상되는지?

선형 다중홉 네트워크의 경우의 가장 대표적인 예로 MMR (Mobile Multihop Relay, IEEE 802.16j, [5])를 들 수 있다. 단지 MMR이 아니더라도 단말기와 기지국 사이에 중계를 담당하는 중계 노드가 있는 대부분의 셀룰러 기반의 시스템에서 우리는 선형 다중홉 네트워크를 찾을 수 있다 (그림 3).

물론 이때 중계 노드는 단순한 Amplify-and-forward를 하는 아날로그 중계기가 아닌, Decode-and-forward를 하는 디지털 중계기의 역할을 수행할 수 있다는 선행 조건이 존재한다.



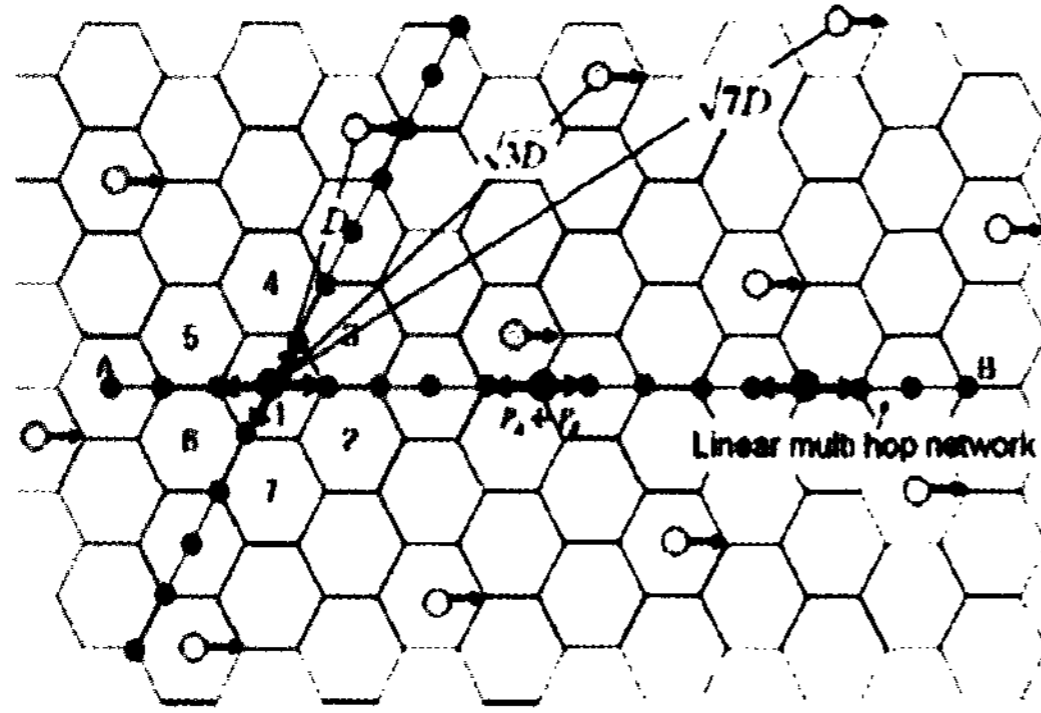
(그림 3) MMR 릴레이 시나리오

IEEE 802.16j 기반 시스템의 특징인 릴레이 노드의 도입은 위에서 언급한 양방향 정보 (Bidirectional traffic)의 전형적인 예가, 단지 이상적인 MANET과 같은 네트워크상에서 뿐만 아니라, 실제로 셀룰러 상황에서도 충분히 존재함을 보여준다. 그러나 이와 같은 시스템에 네트워크 코딩을 적용하기 위해서는 현재의 프레임 구조의 변경이 필수적이라고 할 수 있다. 예를들어 IEEE 802.16j의 Nontransparent Mode의 릴레이 통신에서 RS가 MR-BS와 MS로 동시에 전송해주는 일종의 네트워크 코딩 구간 (NC-Zone)을 구성해야 할 것이다.

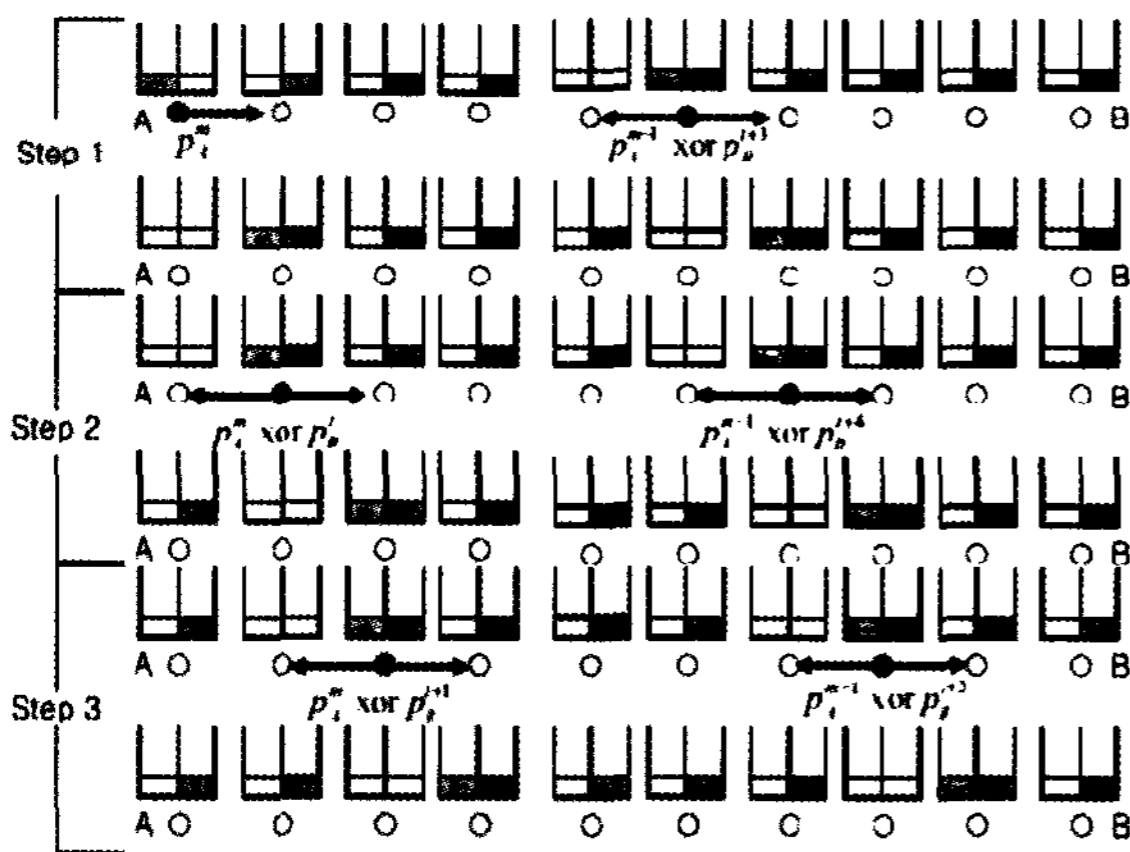
최근의 연구 [6]에서는 802.16j기반의 MMR시스템에서 NC-Zone을 구성하여 MS와 MR-BS간의 양방향 정보를 RS가 네트워크 코딩하여 중계할 수 있는 실증적인 결과를 담고 있으며, 이때 RS의 위치에 따라서는 상당한 수준의 네트워크 코딩 이득을 얻을 수 있음을 보여주고 있다.

본 논문의 이하에서는 위에서 언급된 몇가지 의문점들을 조망하도록 하겠다. 먼저 다중홉 선형 네트워크에서의 네트워크 코딩 이득을 다음장에서 살펴보고자 한다. 이후에서 언급되는 모든 네트워크는 무선 통신 기반의 다중홉 선형 네트워크를 의미한다.

### III. 네트워크 코딩과 계층간 최적화



(그림 4) 다중 홉 선형 네트워크. 선형 토폴로지의 경우 노드 A와 B를 잇는 직선만을 고려. D는 동시 전송 가능한 최소 홉간 거리를 의미 [3], [7]



(그림 5) 주파수 재사용 홉이 5일 경우, 네트워크 코딩이 사용된 선형 네트워크.  $p_a$ 는 노드 A에서 발생된 패킷을 의미 [3]

(그림 4)와 같이 양단에 위치한 A노드와 B노드가 서로를 향해 패킷을 전송하는, 양방향 트래픽의 선형 멀티 홉 네트워크를 고려해보자. 이를 보다 구체적으로 (그림 5)에서는 네트워크 코딩과 CSMA/CA가 함께 사용되고 있는 경우를 설명하고 있다. 노드 A와 노드 B는 서로를 향해 전송을 시도하며, 상호 패킷 로드는 동일하다고 가정한다. 즉, 각 방향으로 전송되어질 패킷의 발생률과 총량은 동일하다. 모든 중간 노드들은 두 개의 FIFO 버퍼를 유지하는데, 하나는 노드 A에서 B 방향으로, 나머지 하나는 반대 방향의 패킷 전송을 위해 사용된다. 각 노드는 bit-wise XOR 연산과 같은 방법으로 인코딩하고 받은 패킷을 디코딩하는 기능을 가진다. 각 노드는 A와 B로부터 받은 두 개의 패킷을 새로운 패킷으로 인코딩하여 양방향으로 전송하며, 이 노드와 가장 근

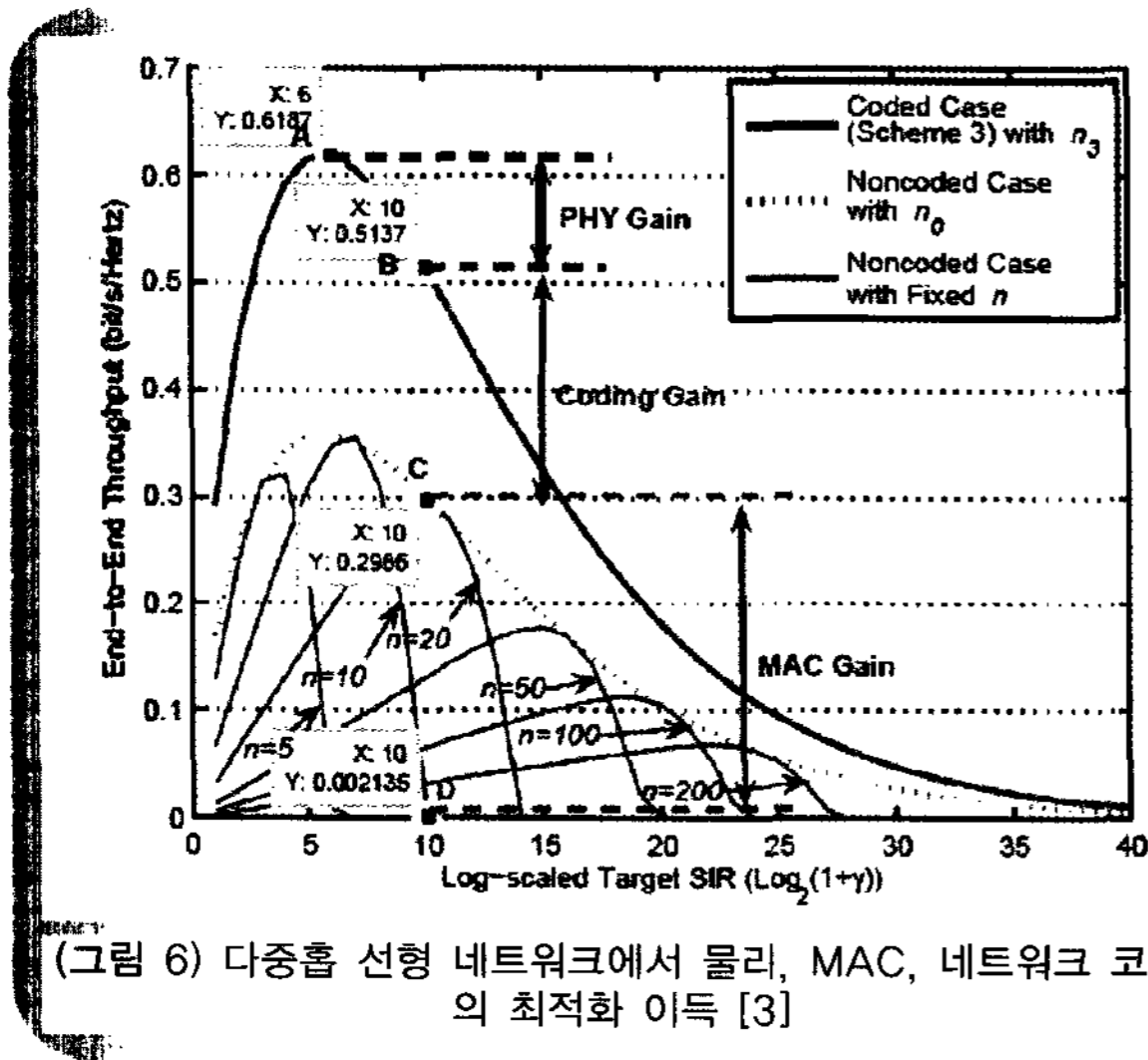
접한 양쪽 노드는 코딩된 패킷을 수신하여 자신이 이미 전송한 패킷을 이용해 디코딩한다. 이러한 과정은 주파수 재사용 홉 거리  $n$ 만큼 떨어져 있는 다른 모든 노드들에 반복되어 나타나며, 그 결과 트래픽은 양방향으로 단절됨 없이 전송될 수 있다.

(그림 5)에서 전송을 시도하는 노드는 왼쪽과 오른쪽의 수신 노드를 동시에 제어해야 하므로 네트워크 코딩이 적용되지 않을 경우보다, 주파수 재사용 홉간의 거리가 멀어질 가능성이 있다. 이는 동시 수신 노드의 숫자가 2배로 증가함으로써, 이를 간섭으로 보호하기 위한 노력이 필요하다는 것으로부터 예측할 수 있다. 이는 링크 활성 요소 (Activity Factor)가 감소하는 것을 의미하는 것으로, 네트워크의 자원을 비효율적으로 사용하여 End-to-end throughput을 감소시키는 결과를 가져올 수도 있다 [3].

(그림 4) 및 (그림 5)와 같은 다중홉 선형 네트워크에서는 End-to-end throughput를 최대화하기 위해서 계층간 최적화 문제가 존재한다 [3], [7]. 즉, 물리 계층의 단일 링크에서의 전송 속도와 MAC 계층의 주파수가 재사용되는 홉간의 거리를 동시에 최적화해야 한다 [7]. 단일 링크에서의 전송 속도가 높을 경우 수신 노드에서 요구되는 SIR이 높게 나타나고, 이를 위해서 주파수 재사용 홉의 거리가 증가하게 된다. 그러나, 주파수 재사용 홉간의 거리가 증가하게 되면, 링크의 활성도가 감소하게 되어 이는 End-to-end throughput를 감소시키는 요인이 된다. 이를 위해서 두 파라미터간의 계층간 최적화가 요구된다.

(그림 5)에서와 같이, 네트워크 코딩이 적용되는 경우에는 전송 노드 왼쪽과 오른쪽 양쪽에 수신 노드가 존재함으로써, 송신 노드의 전송 속도는 이 두 개의 수신 노드의 최소 성능과 일치하게 된다. 따라서 두개의 수신 노드의 최소 성능을 어느 정도 유지하기 위해서는 네트워크 코딩이 적용되지 않은 경우에 비해서 보다 강화된 주파수 재사용 홉간의 거리를 유지하게 된다. 최근의 연구 [3]에서는 네트워크 코딩이 적용되는 다중홉 선형 네트워크에서 최적 주파수 재사용 홉간의 거리가 네트워크 코딩이 적용되지 않는 경우에 비해서 증가됨을 이론적으로 보이고 있다. 이때, 링크의 활성도 감소로 End-to-end throughput을 감소시키는 결과를 초래할 수 있다. 그러나, 네트워크 코딩이 적용되는 경우, 하나의 노드가 동시에 양쪽으로 정보를 전송함으로써 End-to-

end throughput이 증가되는 효과가 역시 존재한다. 전체적으로로는 네트워크 코딩이 적용되지 않는 경우보다, 적용되는 경우의 이득이 존재하는 것을 이론적으로 보일 수가 있다 [3].



(그림 6) 다중홉 선형 네트워크에서 물리, MAC, 네트워크 코딩의 최적화 이득 [3]

이와 같은 이론적인 결과를 사용하여, (그림 6)은 다중홉 선형 네트워크에서 각 계층별 최적화 결과를 도식적으로 나타내고 있다. 예를 들어, A, B, C, D 각 점 중에서, A와 B 사이에 보이는 차이는 물리 계층에서의 최적화된 점과 그렇지 않은 임의의 점의 차이를 나타낸다. 즉 그래프의 x좌표에 해당하는 링크간 목표 SIR 값이 예를들어 약 5 일 경우, 주어진 채널 환경에서 최대의 End-to-end throughput을 얻을 수 있음을 보여주고 있다. 이에 비해, 주어진 환경에서 약 10의 목표 SIR을 선택할 경우, B점이 나타내는 성능밖에 달성하지 못한다. 이것은 물리계층의 목표 SIR값에 의한 차이이므로, 물리 (PHY) 계층 최적화 이득이라 할 수 있다. 마찬가지로, MAC 이득이라 함은, 그래프의 C와 D의 차이를 나타낸다. MAC 계층의 최적화 대상 인자로서 주파수 재사용 노드간 홉 수 n (또는 전송주파수 감지 영역)을 고려했을 때, 주어진 상황(신호감쇄, 목표 SIR값)에 맞는 최적화 된 재사용 거리 (이 그래프에서는 n=20)가 사용된다면, 점 C와 같은 성능을 낼 수 있는 반면, 같은 상황에서 최적화되지 않은 재사용거리 (이 그래프에서는 n=10)가 사용된다면, 점 D와 같이 성능이 거의 나지 않는 경우가 생길 수도 있다.

앞의 두가지 PHY 계층 최적화 이득과 MAC 계층 최적화 이득은 네트워크 코딩이 적용되던 되지 않던 주어진 상황에 대한 의존적으로 변하는 값인데 반해, (네트워크) 코딩 이득은 말 그대로 네트워크 코딩을 적용하느냐, 마느냐에 따라 보여지는 이득을 의미한다. 그래프에서 B와 C를 비교해 보면, 둘 다 동일한 채널 상황, 동일한 목표 SIR이 주어졌을 때, C는 이 상황에 맞는 최적화된 MAC 인자인 주파수 재사용 거리 (최적화 계산 결과 n=20)가 사용된 것이고, B는 같은 환경에서 네트워크 코딩이 사용될 때의 최적화된 재사용 거리 (최적화된 계산 결과 n=25.3)가 사용된 것이다. 이 경우, 예상하는 바와 같이 네트워크 코딩의 사용은 분명한 이득을 보인다 [3].

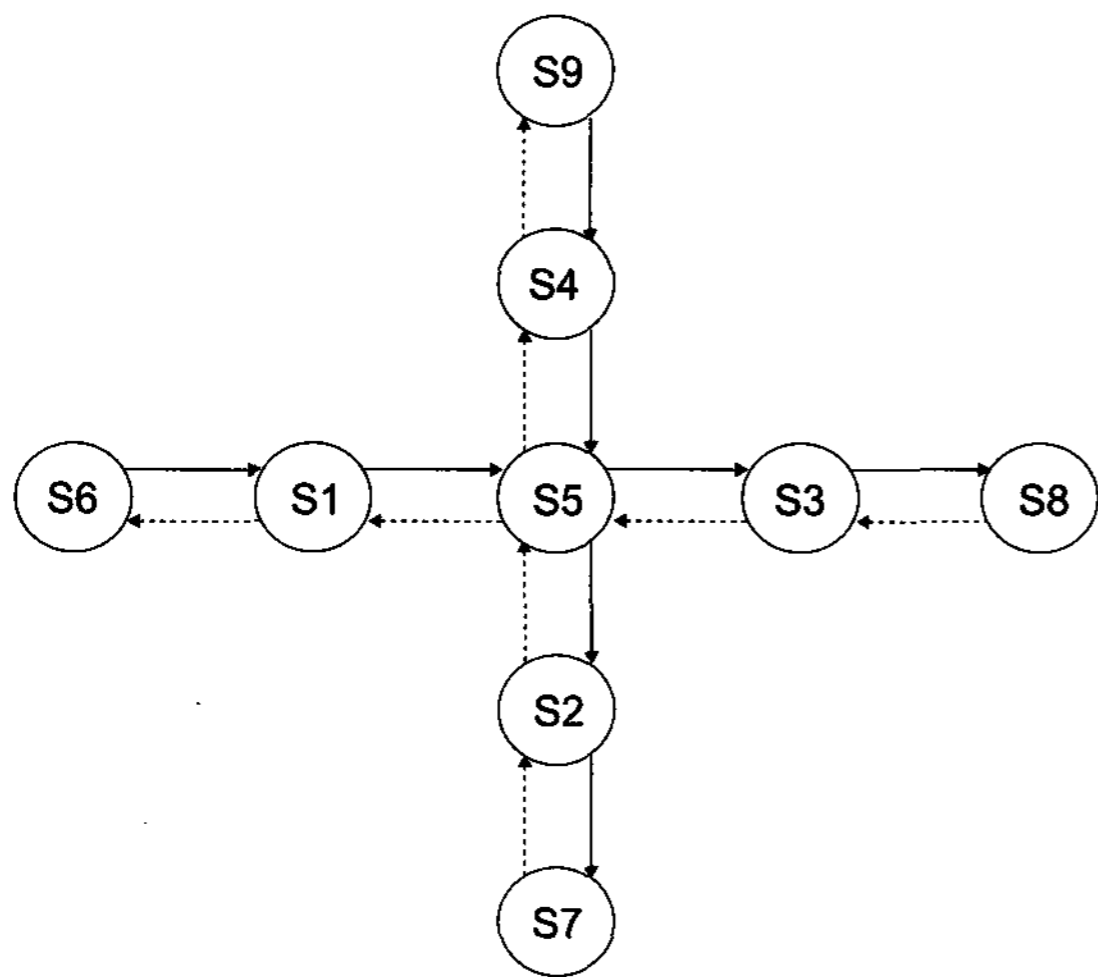
그런데, 단순히 네트워크 코딩을 적용하는 것이, 위의 그래프와 같이 항상 이득을 주는 것 아니다. 링크의 에러를 보정하기 위해서 재전송 기법(ARQ)이 무엇이냐에 따라서 네트워크 코딩의 이득은 다양하게 나타날 수 있다. 재전송을 많이 해야 하는 상황이라면, 네트워크 코딩이 오히려 네트워크의 효율을 저하시킬 수가 있다. 예를 들어, 목표 SIR이 매우 높을 경우, 중계 노드가 양방향에 있는 노드에 정보를 성공적으로 전달하기 위하여, 적용된 재전송 기법에 따라서는, 많은 재전송을 해야하는 경우가 발생하는데, 이런 경우, 오히려 네트워크 코딩을 적용하지 않는 경우가 효율적일 수 있다. 즉, 양방향 전송시의 양쪽 무선 링크의 성공 여부가 서로 독립적이기 때문에 단방향 전송후 다른 방향으로 다시 단방향 전송하는 것이 동시에 양방향 전송을 성공시키는 것보다 효율적인 경우가 존재한다는 것이다. 이것은 만약 양방향 전송이 아닌 좀 더 일반적인 네트워크에서는 무조건적인 네트워크 코딩의 이득을 보장하기가 더 어렵다는 것을 의미한다. 한편 이와 같은 네트워크 코딩 이득은 재전송뿐만 아니라 Overhearing문제에 의해서도 다른 결과를 가져올 수 있는데, 다음 장에서 그 예를 살펴보고자 한다.

#### IV. 네트워크 코딩 밀도

네트워크 코딩 밀도 ((Network Coding Density))라 함은 주어진 무선 네트워크에서 네트워크 코딩을 하는 노드의 숫

자가 전체 노드에서 어느 정도 차지하는 지를 나타낸다. 앞에서 언급된 다중홉 선형 네트워크를 포함해서, 일반적인 네트워크에서는 최적의 네트워크 코딩 밀도가 존재할 것으로 예측되고 있다 [8].

먼저, 이와 같은 문제를 살펴보기 위해 다중홉 무선 네트워크로 구성된 (그림 7)의 경우를 살펴보자. 이는 두 개의 source 노드와 destination 노드로 구성된 양방향 네트워크로 구성되어 있다. 즉 S6은 S8을 향해, S8은 S6을 향해 양방향 전송하며, 이와 마찬가지로 S7은 S9를 향해, S9는 S7을 향해 전송을 시도한다. 여기서 각 노드들은 전송을 시도하기 전에 채널을 감지하여 만약 채널이 다른 용도로 이미 사용되고 있는 것으로 인식되면 전송을 억제하는 방법 (예를 들어, CSMA/CA MAC)을 사용한다고 가정한다.



(그림 7) 크로스-체인 네트워크에서의 양방향 데이터 전송 모델 [8]

(그림 7)에서 각 S6, S7, S8, S9 노드들은 서로 충분한 거리만큼 떨어져 있으므로 동시 전송이 가능하다. 그러나 S1, S2, S3, S4, S5 노드 중 한 노드가 전송을 시도할 때, 전송 노드를 제외한 나머지 노드들은 짧은 거리의 제약으로 인해 반드시 수신 모드로 작동해야 하므로 동시 전송이 불가능하다.

S1, S2, S3, S4 노드들은 양방향의 트래픽을 중계하기 위해 일관되게 네트워크 코딩을 적용한다고 가정하자. 그러나 이와는 달리 S5 노드는 네 방향의 흐름이 한 지점으로 모이는 네트워크의 교차점에 위치하고 있고, 여기에 네트워크 코딩

적용 유무에 따라서 네트워크 코딩의 효과를 분석해 볼 수 있다. S5 노드가 네트워크 코딩을 적용하는 경우를 전수적 네트워크 코딩, FNC (Full Network Coding)이라 정의하고, 반면 네트워크 코딩을 적용하지 않는 경우를 부분적 네트워크 코딩, PNC (Partial Network Coding)이라 정의하자.

FNC의 경우, S5에서는 S1, S2, S3, S4로부터 전송받은 패킷을 인코딩한다. 이 때, S1이 S3의 패킷을 무난히 디코딩하기 위해서는 S5를 향해 전송하는 S2와 S4의 데이터를 엿듣는 (Overhearing) 과정이 필수적으로 수반되어야 가능하다. 즉 네트워크 코딩을 시행하지 않을 경우 불필요한 정보임에도 불구하고, S1이 네트워크 코딩된 패킷을 디코딩하기 위해서는 S2와 S4로부터 전송되는 정보를 필수적으로 수신해야 한다. 반면 PNC의 경우, S5에서는 네트워크 코딩을 적용하지 않고, 단순히 패킷의 중계 역할만 담당하므로 S1, S2, S3, S4 노드들은 다른 노드들의 패킷을 엿듣지 않아도 원하는 정보를 전달받을 수 있다.

FNC를 시행하여 Overhearing 문제를 해결해야 할 경우를 고려해보자. S1이 S2의 정보를 엿듣는 과정에서 (그림 7)에 S1과 S2 사이의 거리가 S1과 S5의 거리보다 길다는 사실을 확인할 수 있다. 이 때문에 S1이 S5로부터 수신할 경우보다 S2로부터 수신할 때 더 많은 오류가 발생할 것으로 추정되며, 따라서 S2는 S1을 향해 더 많은 횟수만큼 재전송을 시도할 것이다. 반면 PNC의 경우, 네 방향에서 전송되는 각 패킷을 중계하기 위한 S5의 전송 시간은 네트워크 코딩을 적용할 때보다 약 네 배 이상 소요될 것으로 짐작할 수 있다. 이러한 이유로 FNC와 PNC 중 어떠한 모델이 더 향상된 End-to-end throughput 결과를 가져올 것인지 쉽게 예측하기 어렵다. 그러나 [8]의 연구에 의하면, 일반적인 네트워크에서 PNC의 네트워크 코딩이득이 FNC의 이득보다 더 크게 나타날 수 있음을 이론적으로 검증되고 있다.

## V. 결 론

본 논문에서는 네트워크 코딩 기법이 무선 통신 네트워크에서 적용되는 과정에서 발생하는 여러 특이점과 계층간 최적화 (Cross-layer Optimization) 문제를 소개하였다. 또한 이

의 해결을 통해서 얻어지는 네트워크 코딩 이득 (Network Coding Gain)의 몇가지 측면을 살펴보았다.

한편, 네트워크 코딩을 담당하고 있는 중간 노드가 여러 경로로부터 수신된 각기 다른 정보들을 다시 하나의 신호로 만들어 전송하기 위해서는, 우선 각 수신 정보들을 제대로 디코딩 해내는 것이 필요하다. 수신 신호들이 잘못 디코딩 되는 경우 그로부터 만들어지는 새로운 신호는 잘못된 정보이며, 이러한 에러는 신호가 Destination 노드에 도착하기까지 여러 중간 노드들을 거치면서 디코딩/인코딩 과정을 반복하며 전체 네트워크에 퍼지게 된다. 네트워크 코딩에 관한 기존의 연구들에서는 보통 수신된 신호들이 완벽히 디코딩 된다는 가정하에 이러한 문제점을 간과해 왔으나, 에러 전파 (Error Propagation) 문제는 네트워크의 성능 열화에 심각한 영향을 끼친다. 이것은 Decode-and-Forward 방식의 Cooperative transmission 에서 나타날 수 있는 에러 전파 문제와 유사하며, 네트워크 코딩을 사용하는 경우 이를 해결할 수 있는 적절한 코딩 및 모듈레이션 방법과 수신기 구조의 설계가 필요하다고 할 수 있고, 충분한 연구가 뒤따라야 한다.



[1] R. Ahlswede, N. Cai, S. -Y. R. Li and R. W. Yeung, "Network information flow," IEEE Trans. Info. Theory, Vol. 46 (4), pp. 1204-1216, 2000.

[2] S. Katti, H. Rahul, W. Hu, D. Katabi, M. Medard and J. Crowcroft "XORs in the air: practical wireless network coding," Proc. ACM SIGCOMM, 2006.

[3] J. Hwang, and S.-L. Kim, "Cross-layer optimization and network coding in CSMA/CA based wireless multihop networks," RAMO-TR-2007-5, submitted for publication, 2007.

[4] S. Y. R. Li, R. W. Yeung and N. Cai, "Linear network coding," IEEE Trans. Info. Theory, Vol. 49 (2), pp. 371-381, 2003.

[5] IEEE 802.16j/D1-2008, Air Interface for Fixed and

Mobile Broadband Wireless Access Systems - Multihop Relay Specification, August, 2007.

[6] J. M. Park, J. Hwang, S.-W. Ko, Y. J. Hwang, S.-L. Kim and R. Taori, "Network coding for bidirectional traffic in IEEE 802.16 systems," RAMO-TR-2008-3, submitted for publication, 2008.

[7] J. Hwang, and S.-L. Kim, "A cross-layer optimization of IEEE 802.11 MAC for wireless multihop networks," IEEE Commun. Letters, ol. 10 (7), pp. 531 - 533, 2006.

[8] W. R. Lee and S.-L. Kim, "An end-to-end throughput analysis on partially network-coded linear networks," RAMO-TR-2008-4, submitted for publication, 2008.

## 약 려



김 성 룬

1994년 KAIST 공학박사  
 1994년 ~ 1998년 ETRI 이동통신기술연구단 선임연구원  
 1998년 ~ 2000년 스웨덴 KTH, Dept. Signals, Sensors & Systems 조교수  
 2000년 ~ 2004년 ICU 조교수, 부교수  
 2004년 ~ 현재 연세대학교 전기전자공학부 부교수, 교수  
 관심분야 : Radio resource management, information theory, optimization, networked robotics



황 준

2002년 연세대학교 공학사  
 2004년 연세대학교 공학석사  
 2008년 연세대학교 공학박사  
 2008년 ~ 현재 San Diego State University, Research Scholar  
 관심분야 : Cross-layer optimization in wireless network, network coding in wireless network