

# 가변 크기 Random Linear Coding 기반의 실시간 무선 비디오 전송 시스템의 실험적인 설계 및 구현

\*김중률 \*\*박준상 \*김종원

\*광주과학기술원 정보통신공학과 네트워크미디어 연구실, \*\*홍익대학교 컴퓨터공학과  
\*{jrkim, jongwon}@netmedia.ac.kr, \*\*[jsp@hongik.ac.kr](mailto:jsp@hongik.ac.kr)

## Design and Implementation of Real-Time Video Transport System using Variable Size Random Linear Coding

\*Jongryool Kim, \*\*Joon-Sang Park, \*JongWon Kim

\*Networked Media Lab., Department of Information and Communications,  
Gwangju Institute of Science and Technology (GIST),

\*\*Department of Computer Engineering Hongik University, Seoul, Korea.

### 요약

네트워크 코딩 중 RLC (random linear coding)은 다양한 연구들에서 이미 그 효용성이 입증되었으며 실제 유/무선 네트워크 환경에서 RLC를 적용하는 연구들이 최근 활발하게 진행되고 있다. RLC는 간단한 방법론적인 특성과 그 효용성으로 인해 많은 관심을 받고 있지만, 실제 환경에서 RLC 디코딩 과정이 요구하는 높은 성능 복잡도로 인하여 실용성에 한계를 가진다. 이러한 상황에서 최근 병행 방법 (Parallelized method)을 이용해 RLC 디코딩 과정의 복잡도를 개선하고 이를 실제적인 비디오 전송에 적용하는 연구들이 진행되고 있다. 본 논문에서는 이러한 연구들과 더불어 무선 환경에서의 실시간 비디오 전송을 위한 비디오의 특성을 고려하는 RLC 기반의 실시간 비디오 전송 시스템을 제안한다. 또한 제안한 시스템 실험적으로 구현하고, 이를 실제 무선 네트워크 환경에서 검증하였다.

### 1. 서론

기본적으로 멀티캐스트의 성능 향상을 위하여 유선 통신망에서 출발한 네트워크 코딩 기법은 정보이론(Information Theory) 분야에서 연구되어 그 응용 분야를 넓히고 있다. 이러한 네트워크 코딩 기법의 응용 시 얻을 수 있는 통신망의 전송량 증가라는 장점은 네트워크 코딩 기반의 멀티미디어 전송 부분의 다양한 연구들로 이어졌다 [1][2]. 특히 전체 네트워크의 위상(topology)정보를 필요치 않는 RLC (random linear coding) 기법의 제안 이후 실용적인 유무선 네트워크에서 사용이 가능한 RLC 관련 연구들이 진행되었고, 실제로 비트토렌트(BitTorrent) 시스템 형태의 P2P 시스템에 적용 되었다 [3]. 하지만 기존의 연구들은 대부분 시간 연속성이 매우 중요한 실시간 비디오 전송에 관한 고려가 부족한 상황이다.

따라서 본 논문에서 가변 크기 RLC 기반의 실시간 무선 비디오 전송 시스템을 제안한다. 인코딩된 비디오 프레임들은 일반적으로 대상의 움직임이 많고 적응과 프레임을 구성하는 대상들의 복잡 정도에 근거하여 서로 다른 크기를 가진다. 이러한 가변적인 크기를 가지는 비디오 프레임의 특성을 무시하고 동일한 크기를 기반으로 RLC 인코딩

을 수행하면 하나의 프레임이 서로 다른 RLC 인코딩의 기본 단위인 제너레이션(generation)으로 나뉘어 인코딩될 수 있다. 이 경우 제너레이션 단위로 진행되는 디코딩 과정에서 하나의 프레임을 디코딩/재생하기 위해서는 두 개의 제너레이션을 RLC 디코딩하는 시간이 필요하다. 따라서 해당하는 프레임의 재생 시간을 제대로 만족시키지 못하는 경우가 발생할 수 있다. 이러한 상황은 프레임들의 재생 임계 시간이 짧은 실시간 비디오 전송/재생 시에 더 큰 문제가 된다. 따라서, 본 논문에서는 가변적인 크기를 가지는 비디오의 구조에 RLC의 데이터 구조를 동적으로 맞추어 가변적인 크기의 제너레이션 사이즈를 기반으로 RLC 인코딩/디코딩을 수행한다. 즉 카메라로 획득되어 H.264로 인코딩된 실시간 비디오 데이터를 가변 크기 RLC 기반으로 네트워크 코딩하여 최종 사용자에게 전달하는 실시간 무선 비디오 전송 시스템을 실험적으로 구현하고 성능을 검증한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 관련 연구를 정리하고, 3절에서는 제안하는 RLC를 기반으로 하는 실시간 무선 비디오 전송 시스템을 설명한다. 4절에서는 가변길이 RLC에 기반한 전송 시스템을 검증하기 위한 실험적인 구현과 성능 검증 결과를 소개한다. 마지막으로 5절에서는 논문의 결론을 맺는다.

## 2. Random Linear Coding 네트워크 코딩

네트워크 코딩은 주어진 네트워크에서 전송량의 증가를 위해 중간 경유 노드들에서 전송 받은 데이터들을 조합 또는 인코딩하여 다음 노드들에게 전송한다. 주어진 통신망에서 멀티캐스트 방식의 데이터 전송을 할 경우 최대 전송량을 달성하기 위해서는 네트워크 코딩 기법을 사용하면 효과적이다 [4]. 그러나 네트워크 코딩을 실제 네트워크 환경에 적용할 경우 가장 어려운 문제들 중 하나는 어떤 중간 경유 노드에서 어떻게 인코딩을 할 것인가를 결정하는 문제이다. 주어진 네트워크에서 최적해를 구하기 위한 전제조건은 네트워크의 전체 위상과 간선(branch)들의 비용이 알려져 있다는 것이다. [5]에서 상기한 전제조건하에서 선형부호의 사용이 최적해 달성을 위한 충분조건이라고 증명하였으나, 여전히 동적으로 변하는 가변적인 네트워크 상황을 실시간으로 정확하게 모니터링하고 그 결과를 실제 네트워크 코딩에 적용하는 것은 매우 어렵다. 따라서 전체 네트워크의 위상정보를 필요치 않는 RLC 기법이 제안된 이후, 이를 실용적인 유무선 네트워크에서 사용 가능하도록 개선하는 많은 연구들이 진행되고 있다 [6][7]. RLC는 중간 노드에서 지금까지 전송 받은 데이터를 기반으로 재인코딩 과정을 통해 랜덤 선형조합을 재생성하여 데이터를 전달함으로써 innovation을 보장할 수 있다. 결과적으로 중간 경유 노드들과 최종 클라이언트들이 전송받은 데이터는 기존 데이터들과 선형독립(linear independent)인 innovative 데이터일 확률이 높아져서 주어진 네트워크 상에서 전송량 증가를 보장해 준다.

### 가. RLC 인코딩

RLC는 필드(field) 크기를 가지는 데이터를 기반으로 연산을 수행한다. 필드 크기의 데이터들이 모여 하나의 블록(block)을 이루며, 하나의 블록은 네트워크 상의 데이터 전송 단위가 된다. 이러한 블록들이 모여 하나의 제너레이션이 되고 이러한 제너레이션 단위로 RLC 네트워크 코딩을 수행한다. 따라서 제너레이션의 크기는 하나의 제너레이션을 이루는 블록들의 숫자이며, 제너레이션은 각각의 노드에서 RLC 인코딩/디코딩의 중요한 단위이다.

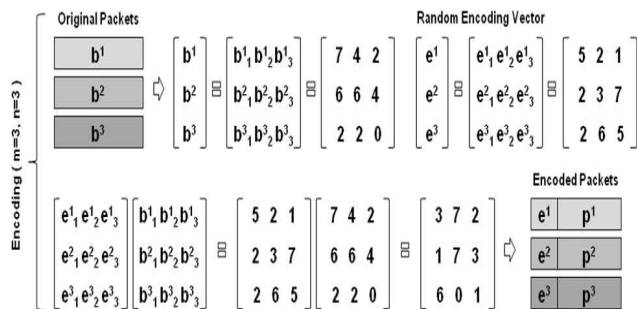


그림 1. RLC 인코딩 예

그림 1은 하나의 제너레이션 크기가 3(=n)이고 3(=m)개 블록이 하나의 제너레이션을 이루고 블록은 3개의 필드로 이루어진 RLC 인코딩 과정을 보여준다. 하나의 제너레이션에 포함되는 블록은  $b^k$ 로 나타내고 하나의 블록은 벡터  $b^k = [b_1^k, b_2^k, \dots, b_m^k]$  ( $k=1, 2, \dots, n$ )로 나타낸다. 인코딩을 위해 무작위로 선택된 인코딩 벡터  $e = [e^1, e^2, \dots, e^n]$ 를 이용하여 RLC 인코딩된 데이터를 다음과 같이 얻어낸다.

$$p_j = \sum_{i=1}^n e_i b_j^i$$

이처럼 무작위로 인코딩 벡터를 선택함으로써, 네트워크 코딩에서 필드 크기가 커질수록 중복성이 일어날 가능성이 줄어들어 RLC의 이점을 얻을 수 있다. 최종적으로 서버는 인코딩된  $P_j$ 와 인코딩에 사용된 인코딩 벡터를 더해 하나의 패킷으로 구성하여 전송한다.

### 나. RLC 디코딩

RLC 디코딩은 다른 노드들로부터 수신한 패킷들로부터 원본 데이터를 복원해내는 과정이다. 리시버는 인코딩 벡터와 RLC로 인코딩된 패킷들을 통하여 원본 데이터를 복구해 낸다.

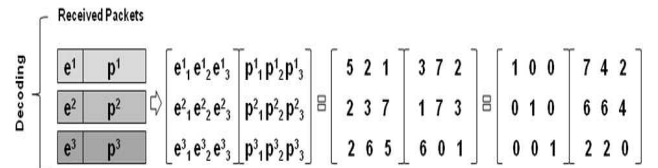


그림 2. RLC 디코딩 예

그림 2는 RLC 디코딩 과정을 보여준다. 즉, 디코딩 행렬을 만든 후, 가우스 소거법(Gaussian elimination)을 이용하여 원본 데이터들을 복원해 낸다. 이를 위하여 적어도 제너레이션 크기에 해당하는 n개의 인코딩 벡터들이 모두 선형독립이어야 한다. 즉, 패킷을 수신할 때 각 패킷의 인코딩 벡터들이 기존에 받아진 패킷들의 인코딩 벡터들과 일차독립인 패킷들만을 수신하고 이 패킷의 숫자가 적어도 n이 되어야 한다. 이렇게 n개의 패킷을 받은 후 가우스 소거법을 이용하여 원본 데이터를 복원한다.

## 3. 가변 크기 RLC 기반 실시간 무선 비디오 전송

무선 환경에서 효율적인 실시간 비디오 전송을 위하여 가변 길이 RLC 기반의 전송 시스템을 제안한다. 제안하는 시스템은 실시간 라이브 무선 비디오 전송뿐만 아니라 on-demand delivery 모듈에 적용 가능하다

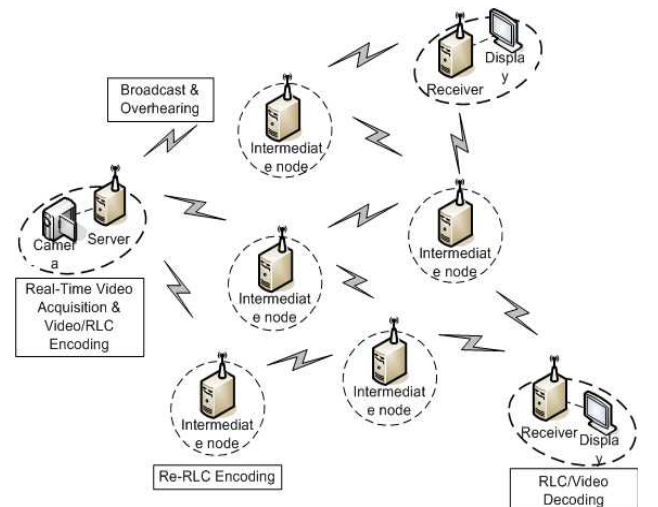


그림 3. RLC 기반의 실시간 무선 비디오 전송 시스템 개요

그림 3은 제안하는 RLC 기반의 실시간 무선 비디오 전송 시스템의 개요를 보여 준다. 카메라로 받아들인 실시간 영상 정보를 소프트웨어 기반의 비디오 인코딩과 RLC 인코딩을 수행하여 무선 네트워크를 사용하여 전송한다. 중간 노드들은 overhearing한 데이터를 기반으로 재인코딩(re-encoding)을 수행하여 최종 사용자에게 전달한다. 즉 무선 broadcasting과 overhearing을 기본으로 가정하는 제안 시스템은 아래와 같은 특징들을 가진다.

- 실시간 지원: RLC 기반의 실시간 무선 비디오 전송을 위해 실시간으로 획득된 카메라 영상을 H.264 인코딩하고, 추가로 RLC 인코딩하여 전송한다. 리시버는 RLC 디코딩한 후 확보된 비디오 데이터를 H.264 디코딩한 후 최종적으로 비디오를 재생한다.
- 소프트웨어 기반: 제안 시스템은 구성의 유연성과 다양성을 지원하고자 소프트웨어 기반의 비디오/인코딩 디코딩을 사용한다. 또한 소프트웨어 구현시 컨트롤 채널을 이용하여 상호적인 개인화된 서비스 적용 가능성을 고려한다.
- 무선 네트워크 특성 활용: 무선 네트워크의 broadcast 성향과 이를 활용한 중간 노드들의 overhearing을 이용하여 RLC 성능을 향상시킨다.

제안하는 가변 길이 RLC 기반의 실시간 무선 비디오 전송 시스템은 서버의 역할을 비디오 인코딩 서버와 RLC 인코딩 서버로 나눈다. 그러므로 본 시스템은 카메라, 비디오 획득/인코딩 서버, RLC 인코딩/전송 서버, RLC 재인코딩을 수행하는 중간 노드들, RLC 디코딩 리시버, 비디오 디코딩/재생 리시버로 구성된다.

### 가. 시스템 구조

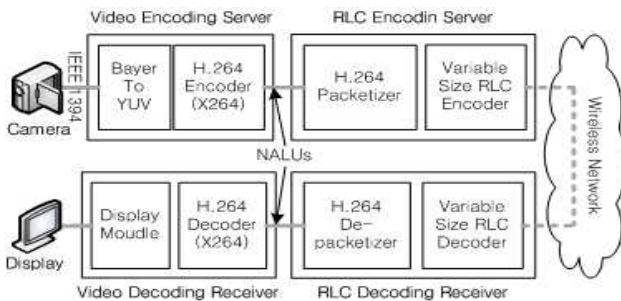


그림 4. 가변 크기 RLC 기반의 실시간 무선 비디오 전송 시스템

그림 4는 본 논문에서 제안하는 가변 크기 RLC 기반의 실시간 무선 비디오 전송 시스템의 구조를 보여준다. 비디오 획득 파트는 카메라, 비디오 인코딩 서버, RLC 인코딩 서버로 구성된다. 카메라로 실시간 획득된 비디오 데이터는 H.264 인코딩을 위해 카메라로부터 획득된 데이터 포맷에서 YUV 포맷으로 변환된다. YUV 포맷으로 변환된 영상 데이터는 H.264 인코더에 의해 실시간으로 인코딩되어 NALU (network abstraction layer unit) 형태로 RLC 인코딩 서버로 전송된다. 전송된 NALU들은 H.264 Packetizer에 의해 각각의 프레임 타입별로 구분되고 프레임 타입별로 분류된 NALU들을 기반으로 가변 크기 RLC 인코더를 이용하여 RLC 인코딩을 수행한다. RLC 인코딩 데이터들은 무선 네트워크를 통하여 실시간으로 전송된다. RLC 디코딩 리시버는 가변 크기 RLC 디코더를 이용하여 RLC 인코딩된 데이터와 함께 전송된 랜덤 벡터를 이용하여 가변 크기 RLC 디코딩을 수행한다. 이때 서버에서 보내준 제네레이션 크기를 기반으로 하여 가변적인

제네레이션 사이즈에 맞추어 RLC 디코딩을 수행한다. 디코딩된 데이터들은 NALU의 형태로 H.264 De-packetizer에 의해 각각의 프레임 타입별로 구분되어 비디오 디코딩 리시버로 전송된다. 비디오 디코딩 리시버는 H.264 디코더를 사용하여 인코딩된 비디오 데이터를 디코딩하고 최종적으로 재생한다.

### 나. 가변크기 RLC 인코딩

가변 크기 RLC는 인코딩된 비디오 데이터의 특성에 맞추어 가변적인 크기의 GOP(group of picture)를 하나의 제네레이션 크기로 간주하고 RLC 인코딩을 수행한다. 일반적으로 비디오 데이터는 획득한 영상의 특징에 따라서 서로 다른 가변적인 크기를 가지는 프레임들로 구성된다. 즉 움직임이 많고 적음, 프레임을 구성하는 대상들의 복잡 정도에 근거하여 서로 다른 크기를 가진다. 이러한 가변적인 크기를 가지는 인코딩된 비디오 프레임의 특성을 무시하고 동일한 크기를 기반으로 RLC 인코딩을 수행하게 되면 하나의 프레임이 서로 다른 인코딩 제네레이션으로 나뉘어 인코딩되는 경우가 발생한다. 따라서 복잡한 계산이 이뤄지면서 각 제네레이션 단위로 진행되는 디코딩 과정에서, 전송한 바와 같이 한 프레임을 재생하기 위해서 두 개의 제네레이션이 RLC 디코딩되는 시간이 필요할 수 있으며, 이 여파로 해당하는 프레임의 재생 시간을 만족시키지 못할 수 있다.

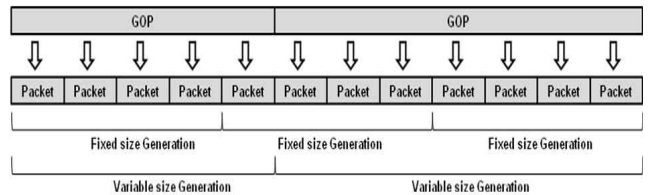


그림 5. 비디오 데이터의 RLC 인코딩

따라서, 그림 5와 같이 가변적인 크기를 가지는 비디오의 구조에 RLC의 데이터 구조를 동적으로 맞추어 가변적인 크기의 제네레이션 사이즈를 기반으로 RLC를 수행할 필요가 있다. 그림 5처럼 가변적인 크기를 가지는 비디오 데이터의 특징으로 인해 GOP는 서로 다른 수의 패킷들로 이루어진다. 따라서 비디오 데이터를 RLC를 통하여 인코딩하기 위해서는 가변적인 크기의 제네레이션 크기를 수용하도록 비디오 데이터를 실시간으로 해석하여 RLC 인코딩을 수행해야 한다. 즉 실시간으로 비디오 인코딩된 데이터들의 헤더정보를 해석하여 각 GOP의 가변적인 크기를 인지하고 이를 바탕으로 가변적인 제네레이션 크기의 RLC 인코딩을 수행하며 가변적인 제네레이션 크기 정보를 네트워크 단의 헤더 정보에 넣어서 중간 노드들과 최종 노드에서 이 정보를 바탕으로 RLC 재인코딩과 RLC 디코딩을 수행할 수 있도록 한다.

### 4. 실험적인 구현 및 성능검증 결과

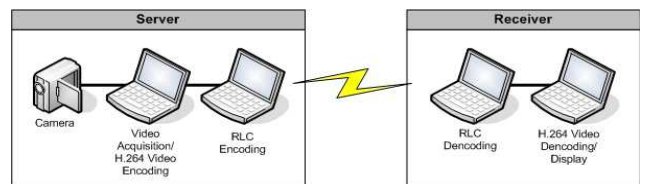


그림 6. 가변 크기 RLC 기반 실시간 무선 비디오 전송 시스템 테스트베드

그림 6은 현재 단계에서 구현된 가변 크기 RLC 기반 실시간 무선 비디오 전송 시스템 테스트베드이다. 본 시스템은 실시간으로 영상을 획득하는 카메라와 획득된 영상 데이터의 비디오 인코딩을 담당하는 머신과 RLC 인코딩을 담당하는 머신 RLC 디코딩을 담당하는 머신과 최종적으로 비디오 디코딩을 통해 비디오를 재생하는 머신으로 구성된다. 사용한 FLEA-HICOL-CS 카메라는 512x384 픽셀 크기의 초당 20 프레임의 비디오를 IEEE1394 [8] 네트워크를 통해 비디오 획득/인코딩 머신에 전달한다. 비디오 인코딩을 위해서는 H.264를 기반으로 하는 소프트웨어 기반의 x264 라이브러리 [10]를 사용한다. 무선 네트워크는 IEEE 802.11 기반의 멀티 홉 무선 네트워크를 염두에 두고, 현 단계에서는 한 홉 전송만 실험한다.

RLC 인코딩 머신은 비디오 획득/인코딩 머신으로부터 NALUs 형태의 인코딩된 데이터를 전송 받아 각각의 비디오 타입으로 분류한다. 각각의 NALU은 0x00 00 00 01의 스타트 코드에 의하여 구분된다. NALU 헤더의 nal\_unit\_type를 확인함으로써 각각의 NALU이 포함하고 있는 RBSP (raw byte sequence payload)를 구분할 수 있다 [9]. Nal\_unit\_type이 1, 2, 3, 4, 5 인 VCL (video coding layer) 즉 실제 인코딩 된 비디오 데이터들은 각각의 비디오 프레임 타입에 근거하여 분류되어 RLC 인코딩 된다. Nal\_unit\_type이 7, 8에 해당하는 SPS (sequence parameter set)와 PPS (picture parameter set)와 같은 비디오 디코딩에 필요한 헤더 정보에 해당하는 데이터들은 VCL 데이터들이 전송되기 전에 먼저 각각의 제너레이션 단위로 RLC 인코딩 되어 RLC 인코딩된 데이터와 인코딩에 사용된 랜덤 벡터가 하나의 패킷을 이루어 IEEE 802.11a 무선 네트워크를 사용하여 전송된다. 리시버는 전송 받은 데이터들을 RLC 디코딩 하여 얻어진 H.264 NALU들의 데이터들을 x264 디코더를 사용하여 비디오 디코딩하여 최종적으로 재생한다.

성능 검증을 위하여 512x384 픽셀 사이즈의 비디오 데이터를 사용하였다. 89% 압축율로 압축하여 비디오 데이터는 초당 484kbps의 bit rate을 가지며 인코딩된 비디오의 GOP는 I B B P B B P B B P 로 구성된다. 초기(initial) 버퍼링은 실시간 비디오 전송의 특성을 반영하여 GOP 단위로 이루어진다. 성능 비교를 위하여 블록 크기 1000, 제너레이션 크기 20인 고정 크기의 RLC와 GOP 크기를 하나의 제너레이션 단위로 하는 유동적인 가변 크기 RLC를 각각 30번씩 수행하여 평균한 결과를 구하였다.

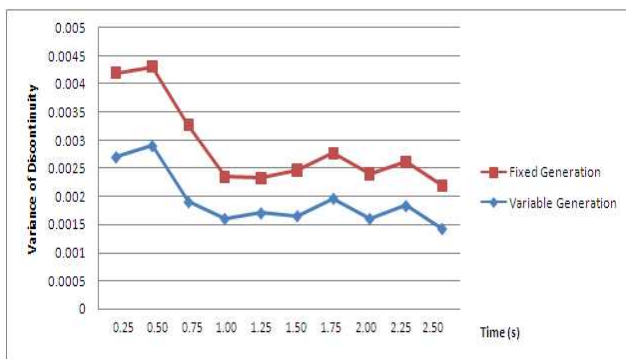


그림 7. Variance of discontinuity

그림 7에서 보이는 것처럼 고정 크기 RLC의 경우 평균 0.001926의 variance of discontinuity [11] 값을 가변 크기 RLC의 경우 평균 0.000964의 variance of discontinuity 값을 보여주었다. 결과적으로 가

변 길이 RLC를 이용한 실시간 비디오 전송의 경우 더 나은 variance of discontinuity 값을 보여준다. 더 나은 variance of discontinuity는 최종 사용자에게 더 나은 실시간 무선 비디오 서비스를 가능하게 한다.

## 5. 결론

본 논문에서는 가변적인 크기의 RLC를 이용한 실시간 무선 H.264 비디오 전송 시스템을 제안, 실험적으로 구현하였다. 구현된 시스템은 소프트웨어 기반의 RLC 기반의 실시간 무선 비디오 전송 시스템으로 실시간으로 획득된 영상 데이터를 x264인코더를 사용하고 가변적인 크기 RLC 기법을 적용하여 결과적으로 사용자에게 향상된 실시간 무선 비디오 전송 서비스를 가능하게 하였다.

## 감사의 글

“이 논문 2009년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임” (KRF-2008-313-D00682)

## 참고문헌

- [1] H. Seferoglu and A. Markopoulou, "Opportunistic network coding for video streaming over wireless," in *Proc. of Packet Video*, 2007
- [2] D. Nguyen, T. Nguyen, and Xue Yang, "Multimedia wireless transmission with network coding," in *Proc. of Packet Video*, 2007
- [3] Y. Liu, Y. Peng, W. Dou, and B. Gou, "Network coding for peer-to-peer live media streaming," in *Proc. of the GCC (International Conference Grid and Cooperative Computing)*, 2006
- [4] R. Ahlswede, N. Cai, S. Li, R. Yeung, "Network information flow," *IEEE Transactions on Information*, 2000.
- [5] R. Koetter, M. Medard, An Algebraic, "Approach to Network Coding," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2003.
- [6] P. Chou, Y. Wu, K. Jain, "Practical network coding," in *Proc. of Allerton Conference on Communication, Control, and Computing*, 2003.
- [7] T. Ho, R. Koetter, M. Medard, D. Karger, M. Effros, "The benefits of coding over routing in a randomized setting," in *Proc. of IEEE ISIT (International Symposium on Information Theory)*, 2003.
- [8] H. Jeong, M. Lee, D. Lee, and S. Kang, "Design of home network gateway for real-time A/V streaming between IEEE1394 and Ethernet," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2007.
- [9] T. Wiegand, G. J. Sullivan, G. Bjontegaard, and A. Luthra, "Overview of the H.264/AVC video coding standard," *IEEE Transactions on CSVT*, 2003.
- [10] x264, <http://www.videolan.org/developers/x264.html>.
- [11] N. Laoutaris and I. Stavrakakis, "Adaptive playout strategies for packet video receivers with finite buffer capacity," in *Proc. IEEE ICC*, 2001.