

LDPC 부호에 기반한 Hybrid ARQ 기법

준희원 안 석 기*, 명 세 호*, 종신회원 양 경 철*

Hybrid ARQ for LDPC-coded Systems

Seok-Ki Ahn*, Seho Myung* Associate Members, Kyeongcheol Yang* Lifelong Member

요 약

본 논문은 LDPC 부호에 기반한 HARQ 기법으로서 소수의 패리티 검사 행렬을 설계한 후 패리티 천공과 전송된 부호어의 일부를 재전송하여 결합하는 방법을 이용해 넓은 범위의 정보처리량을 지원하는 방법을 소개하고, 원하는 정보처리량을 얻기 위해 사용해야 할 기법의 선택 기준을 제시한다. 또한, Raptor 부호의 구조를 가지는 다선분형(multi-edge type, MET) LDPC 부호를 이용해 IR 기법을 사용하는 HARQ 시스템을 설계할 경우, 통상적인 LDPC 부호에 패리티 천공과 재전송 및 결합 기법을 적용한 HARQ 시스템보다 우수한 성능을 보임을 전산 실험을 통해 검증한다.

Key Words : Hybrid ARQ, incremental redundancy, low-density parity-check codes

ABSTRACT

In this paper, we propose an LDPC-coded hybrid ARQ system using incremental redundancy and retransmission of a part of the transmitted packets. We also present a simple criterion for choosing two methods to support a desired throughput efficiently. Furthermore, we show that the throughput performance can be improved when multi-edge type LDPC codes with the structure of Raptor codes are employed for a hybrid ARQ scheme.

I. 서 론

무선 통신 환경에서 우수한 데이터 서비스를 제공하기 위해서는 데이터 전송 시 발생하는 오류를 보상해줄 수 있는 기법이 필요하다. 이를 위한 오류 제어 기법으로서 오류정정 능력을 가진 부호를 사용하여 수신된 정보의 오류를 정정하는 FEC (forward error correction) 기법과 전송된 패킷에서 오류가 검출되면 송신단으로 재전송을 요구하는 ARQ (automatic repeat request) 기법이 일반적으로 사용된다. 하지만 FEC 기법만 사용하면 오류정정에 실패한 패킷이 사용자에게 그대로 전달되거나 모두 버려지며, ARQ 기법만 사용하면 채널 품질(channel

quality)이 나빠짐에 따라 정보처리량(throughput)이 급격히 감소한다는 단점이 있다. 이러한 단점들은 두 기법을 결합한 HARQ (hybrid ARQ) 기법을 사용함으로써 극복될 수 있다.

무선/이동 통신 시스템은 다양한 채널 환경을 가지는 사용자에게 서비스를 제공해야 하므로 효율적인 HARQ 시스템을 설계하기 위해서는 다양한 부호의 사용이 요구된다. 하지만 복호(decoding) 오류가 빈번하게 발생하는 무선 환경에서는 재전송 요구가 발생한 경우에 패킷을 좀 더 낮은 부호율로 부호화(encoding)하여 재전송하는 것보다, 복호에 실패한 패킷과 재전송 패킷을 결합하여 점차적으로 오류정정 능력을 향상시키는 것이 정보처리량 관점

※ 본 연구는 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음(IITA-2008-C1090-0801-0037).

* 포항공과대학교 전자전기공학과 통신 및 신호설계 연구실(kcyang@postech.ac.kr)

논문번호 : KICS2007-06-251, 접수일자 : 2007년 6월 9일, 최종논문접수일자 : 2008년 11월 3일

에서 유리하다. 본 논문에서는 재전송 패킷을 구성하는 방법으로 사전에 전송된 부호어를 위한 추가적인 패리티를 전송하는 IR (incremental redundancy) 기법과 전송된 패킷의 일부를 재전송하는 PRC (partial repetition and combining) 기법을 사용한다.

Gallager에 의해 처음 소개되었던 LDPC (low-density parity-check) 부호는 Mackay와 Neal에 의해 재발견되어 큰 관심을 받게 되었다^[1]. LDPC 부호는 저밀도 이진 패리티 검사 행렬로 표현이 가능하며, 통상적으로 Tanner 그래프라 명명된 이분 그래프(bipartite graph)를 사용하여 나타낸다 [2]. 불균일한(irregular) LDPC 부호는 채널 용량(channel capacity)에 근접하는 에러 정정 능력으로 차세대 오류 정정 부호로 주목 받고 있다^{[3],[4]}.

본 논문에서는 LDPC 부호에 기반한 HARQ 기법으로서 소수의 LDPC 부호에 패리티 천공(puncturing) 기법과 PRC 기법을 적용하여 넓은 범위의 정보처리량을 지원하는 방법을 제안한다. 또한, 원하는 정보처리량을 얻고자 할 때 사용해야 할 기법의 선택 기준을 제시한다. 그리고 다선분형(multi-edge type, MET) LDPC 부호를 이용해 IR 기법을 사용하는 HARQ 시스템을 설계하면, 통상적인 LDPC 부호를 사용하는 HARQ 시스템보다 높은 정보처리량을 얻을 수 있음을 보인다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II절에서는 본 논문에서 고려하는 HARQ 시스템에 대해 소개한다. III절에서는 천공과 PRC 기법을 이용한 HARQ 기법을 제안하고, IV절에서는 다선분형 LDPC 부호에 IR 기법을 적용한 HARQ 기법을 제안한다. V절에서는 전산 실험을 통해서 제안된 HARQ 기법들의 성능을 확인하고, VI절에서는 본 논문의 내용을 요약, 정리 한다.

II. 시스템 모델

본 논문에서 고려하는 HARQ 시스템을 그림 1에 나타내었다. 송신단에서 오류정정부호를 사용하여 부호화 과정을 거친 후, 채널을 통해 전송된 패킷은 수신단에서 복호된다. 이 때, 오류정정이 성공적으로 수행되면 ACK (acknowledgement) 신호를 송신단으로 전송하여 다음 패킷을 전송하게 하고, 오류가 검출되면 NAK (negative acknowledgement) 신호를 전송하여 재전송을 요구한다. 부호화기에 연결된 버퍼(buffer)는 재전송 패킷을 구성하는데 필요

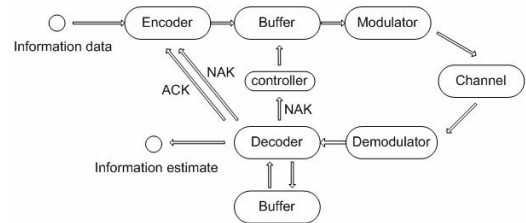


그림 1. Hybrid ARQ 시스템 모델

한 정보를 저장하는 역할을 하고, 제어기(controller)는 버퍼에 저장된 정보를 이용한 재전송 패킷의 구성을 담당한다. 복호기에 연결된 버퍼는 복호에 실패한 패킷을 저장하여 재전송된 패킷과 결합한 후, 다시 복호를 수행할 수 있도록 도와준다.

HARQ 시스템의 성능 평가 기준으로는 복호에 성공한 정보어 비트(bit)의 수를 채널을 통해 전송된 총 비트 수로 나눈 정보처리량이 널리 사용된다. 전송된 패킷에 포함된 redundancy의 양이 늘어날수록 복호 성공 확률이 높아지고 재전송 요구 확률은 낮아지지만, 채널을 통해 전송된 비트 중 정보어 비트의 비율이 낮아지게 된다. 그러므로 정보처리량을 높이기 위해서는 주어진 채널 품질에 맞는 부호율을 가지는 LDPC 부호를 사용하여 적정량의 redundancy를 전송하는 것이 중요하다.

III. 천공과 PRC 기법을 사용한 HARQ 기법

본 절에서는 소수의 LDPC 부호에 패리티 천공과 PRC 기법을 사용하여 넓은 범위의 정보처리량을 지원하는 HARQ 시스템을 제안한다.

3.1 패리티 천공 기법

HARQ 시스템을 위한 IR 기법으로 사용되는 패리티 천공 기법은 재전송 패킷의 구성이 용이하다는 장점 때문에 널리 사용되고 있다. 천공된 패리티 비트는 복호 과정에서 소실(erasure)로 처리되기 때문에 반복 복호가 시작되는 시점의 천공된 부호(punctured code)의 메시지 업데이트 속도는 천공되지 않은 부호보다 느리다. 하지만 천공된 패리티 비트는 반복 복호가 진행됨에 따라 천공된 노드에 연결된 다른 노드들 간의 메시지 전달 경로 역할을 하며 반복 복호 과정에 참여한다. 그림 2는 패리티가 천공된 LDPC 부호의 반복 복호가 시작되는 시점의 메시지 갱신 과정을 나타낸 것이다. ○, ⊕와 ⊗는 각각 변수 노드, 검사 노드와 천공된 패리티 노드를 의미하고, 화살표는 메시지의 전달 방향

을 나타낸다.

그림 2에서 반복 복호가 1회 실행된 시점을 보면, 첫 번째 반복 복호가 종료된 후에도 천공된 패리티 노드에 연결된 노드들의 메시지 갱신이 이루어지지 않은 것을 알 수 있다.

천공된 LDPC 부호는 천공된 비트들이 복호에 참여하는 속도가 느릴수록 복호 수렴 속도가 느려지고, 복호 성능이 열화되는 경향이 있다 [5]. 본 논문에서 사용된 패리티 검사 행렬은 패리티 비트들에 대응되는 부분 행렬이 누산기(accumulator) 형태로 설계되었으므로, 인접한 비트들을 천공하는 경우를 최대한 배제하여 패리티 천공을 수행하였다. 또한, 반복 복호를 충분히 수행한 후에 천공된 부호와 그렇지 않은 부호의 성능이 동일해도, 반복 복호 횟수가 제한된 경우에는 천공된 부호의 성능이 상대적으로 열화된다. 이러한 현상을 검증하기 위해서 전산 실험을 수행하여 그림 3에 나타내었다.

그림 3은 각각 패리티의 0%, 67%, 83%가 천공된 부호들이 200번의 반복 복호를 수행하였을 때 같은 FER (frame error rate)를 가지는 SNR에서의

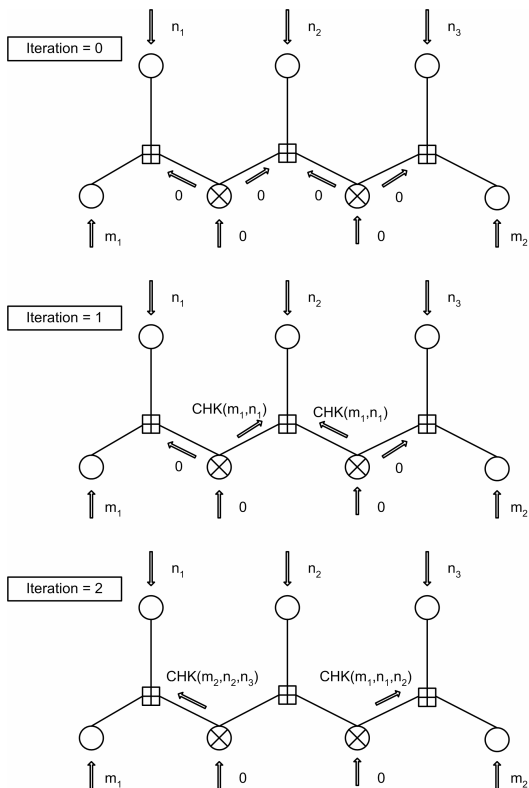


그림 2. 천공된 패리티 노드가 포함된 LDPC 부호의 메시지 갱신 초기 과정

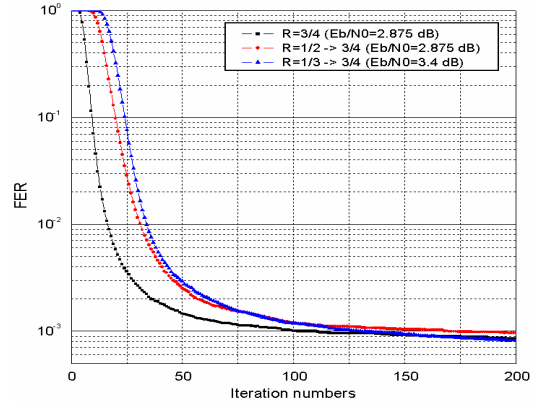


그림 3. 패리티가 천공된 LDPC 부호의 반복 복호 횟수에 따른 FER 성능 변화

반복 복호 횟수에 따른 성능을 나타낸다. 천공된 비율이 높을수록 부호의 복호 수렴 속도가 느려지기 때문에 실제 시스템에서 허용하는 반복 복호 횟수에 따라 천공된 부호의 성능을 그렇지 않은 부호에 비해 상대적으로 크게 변한다.

3.2 PRC 기법

PRC 기법은 전송된 패킷이 복호에 실패한 경우에 패킷의 일부를 재전송하여 기존의 패킷과 결합하는 방법이다. 일반적으로 패킷의 결합 방식은 기존에 전송된 패킷과 재전송된 동일한 패킷의 수신 신호 값들의 평균을 취하는 것이다. 이는 로그 우도 비율(log-likelihood ratio)을 메시지로 사용하는 LDPC 부호의 연판정(soft decision) 복호기의 i 번째 비트에 대한 입력 메시지로

$$\sum_{j=1}^k \frac{2}{\sigma^2} r_i^{(j)}$$

를 사용하는 것과 동일하다. 여기서 σ^2 은 잡음의 분산(variance)을 나타내고, $r_i^{(j)}$ 는 j 번째 재전송했을 때 i 번째 비트의 수신 신호 값이다⁶⁾.

PRC 기법을 사용하는 경우에는 재전송되는 패킷의 구성이 복호 성능에 영향을 미치기 때문에 재전송 패킷에 포함되는 부호어 비트들을 신중히 결정해야 한다. 이는 패리티 검사 행렬의 Tanner 그래프에서 각 부호어 비트에 대응되는 변수 노드의 차수(degree)에 따라 부호어 비트가 복호 과정에 미치는 영향이 다르기 때문이다. 본 논문에서는 전산 실험을 통해서 서로 다른 차수를 가지는 변수 노드에 대응되는 비트들을 재전송하여 성능을 비교한 후, 재전송 패킷에 포함되는 부호어 비트들 간의 우선순위를 결정하였다.

3.3 HARQ 시스템의 설계

본 논문에서는 LDPC 부호에 기반하고 천공과 PRC 기법을 사용하는 HARQ 시스템을 아래와 같이 제안한다.

단계 1: 원하는 범위의 정보처리량을 지원하기 위해 요구되는 LDPC 부호의 전체 부호율 범위 내에서 주요 부호율 $R_1, R_2, \dots, R_M (R_1 > R_2 > \dots > R_M)$ 을 결정하고, 각 부호율을 지원하는 패리티 검사 행렬 H_1, H_2, \dots, H_M 을 설계한다. 패리티 검사 행렬의 차수 분포(degree distribution)는 밀도 진화 분석(density evolution)을 통해서 최적화한다.

단계 2: 필요한 LDPC 부호의 부호율(R)이 $R > R_1$ 인 경우에는 H_1 에 천공 기법을 적용한다.

단계 3: $i = 1, 2, \dots, M-1$ 에 대해서 $R_i > R > R_{i+1}$ 인 경우에는 H_i 에 PRC 기법을 적용하거나 H_{i+1} 에 천공 기법을 적용한다.

단계 4: $R_M > R$ 인 경우에는 H_M 에 PRC 기법을 적용한다.

위와 같이 천공과 PRC 기법을 사용하면 소수의 패리티 검사행렬로 넓은 범위의 부호율을 지원하는 HARQ 시스템을 구현할 수 있다. 특히, 단계 3에서는 천공과 PRC 기법을 선택적으로 적용해야 하는데, 이는 동일한 정보처리량을 얻기 위해 요구되는 SNR이나 복호 복잡도 등을 비교하여 결정할 수 있다. 본 논문의 V절에서는 전산 실험을 통하여 언급된 기법의 선택 방법을 설명한다.

IV. 다선분형 LDPC 부호를 이용한 HARQ 시스템

다선분형 LDPC 부호는 통상적인 LDPC 부호에 비해서 구성에 대한 자유도가 높기 때문에 통상적인 LDPC 앙상블(ensemble)로는 표현할 수 없는 다양한 앙상블의 구성이 가능하다 [7]. 특히, Raptor 부호의 형태를 가지는 다선분형 LDPC 부호는 낮은 부호율에서 우수한 잡음 임계치(noise threshold)를 가지고, 추가적인 패리티를 생성하기 쉬운 구조를 가진다. 따라서 본 논문에서 사용되는 다선분형 LDPC 부호는 그림 4와 같이 Raptor 부호의 구조를 따른다.

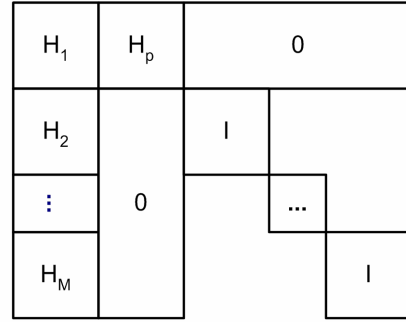


그림 4. Raptor 구조를 적용한 다선분형 LDPC 부호의 패리티 검사 행렬의 구조

그림 4에서 패리티 검사 행렬 $H_{MR_i} = [H_i H_p]$ 는 부호율 R_i 을 지원하는 통상적인 LDPC 부호와 같으며, H_p 는 패리티에 대응되는 부분 행렬을 나타낸다. $i > 2$ 인 경우에 $H_{MR_i} = [H_i O I]$ 는 단일 패리티 검사(single parity-check) 부호들을 나타내며, O 는 영행렬(zero matrix)이다. 추가적인 패리티 생성에 사용되는 $H_{MR_2}, \dots, H_{MR_M}$ 는 H_{MR_1} 와의 연결을 통해 부호율 R_i 를 지원한다. 다선분형 LDPC 부호의 설계 방법은 아래와 같다.

단계 1: 지원하고자 하는 전체 부호율 범위 내에서 주요 부호율 $R_1, R_2, \dots, R_M (R_1 > R_2 > \dots > R_M)$ 을 결정하고, 부호율 R_i 에 해당하는 패리티 검사 행렬 H_{MR_i} 을 설계한다.

단계 2: 부호율 R_2 를 지원할 수 있도록 H_{MR_2} 를 설계한다. H_{MR_2} 의 차수 분포는 H_{MR_1} 의 차수 분포를 동시에 고려해서 최적화한다.

단계 3: 단계 2와 동일한 방법으로 부호율 R_i 를 지원할 수 있도록 H_{MR_i} 를 순차적으로 설계한다.

위와 같이 설계된 다선분형 LDPC 부호를 HARQ 시스템에 적용하는 방법은 다음과 같다.

단계 1: 지원하고자 하는 부호율(R)이 $R > R_1$ 인 경우에는 H_p 에 천공 기법을 적용한다.

단계 2: $i = 1, 2, \dots, M-1$ 에 대해서 $R_i > R > R_{i+1}$ 인 경우에는 H_{MR_1} 부터 $H_{MR_{i+1}}$ 까지 연결한 후, 부호율

R 를 지원할 수 있도록 $H_{MR_{i+1}}$ 에 해당하는 패리티의 일부분을 전송하지 않는다.

단계 3: $R_M > R$ 인 경우에는 H_{MR_1} 부터 H_{MR_M} 까지 연결한 후, PRC 기법을 적용한다.

단계 2에서 부호율 R 를 지원하기 위해 전송하지 않는 $H_{MR_{i+1}}$ 의 패리티는 복호 과정에 참여하지 않는다는 점에서 전송된 패리티 비트와 차이가 있다.

V. 전산 실험 결과

본 논문의 III절에서 소개한 천공 기법 [5]과 PRC 기법을 사용하는 HARQ 시스템은 지원하고자 하는 정보처리량마다 사용되는 기법을 선택해야 한다. 기법을 선택하는 기준을 설명하기 위해서 부호율이 1/3, 1/2, 3/4인 LDPC 부호의 패리티 검사 행렬을 설계하고, 천공과 PRC 기법을 적용하여 전산 실험을 수행하였다. 모든 부호율에서 정보어 길이는 1536비트로 고정하였고, 재전송 패킷의 길이는 256비트로 설정하였다. 부호화된 비트들은 BPSK (binary phase shift keying) 변조를 거친 후에 AWGN (additive white Gaussian noise) 채널을 통해서 전송된다.

또한, 동일한 파라미터(parameter)를 가지는 다선분형 LDPC 부호를 설계하여 IV절에서 제안된 HARQ 기법을 적용하여 전산 실험을 수행하고, 그림 5에 나타내었다.

천공과 PRC 기법을 사용하는 경우에 정보처리량이 0.45인 지점은 부호율 1/2를 지원하는 패리티 검사 행렬에 PRC 기법을 적용하는 것이 부호율 1/3를 지원하는 패리티 검사 행렬에 PRC 기법을 적용하는 것보다 정보처리량이 높은 것을 알 수 있다. 또한, 정보처리량이 0.4인 지점을 살펴보면, 부호율이 1/3인 패리티 검사 행렬에 천공 기법을 적용한 경우와 부호율이 1/2인 패리티 검사 행렬에 PRC 기법을 적용한 경우의 성능이 거의 같음을 알 수 있다. 하지만 PRC 기법을 사용하는 경우가 천공 기법을 사용하는 경우보다 복호기의 복잡도가 작으므로, 정보처리량이 0.4인 지점에서는 PRC 기법을 사용하는 것이 유리하다. 이와 같이 그림 5를 살펴보면, 특정 정보처리량을 지원하는 경우에 사용해야 할 기법을 선택할 수 있다.

하나의 패리티 검사 행렬로 넓은 범위의 부호율

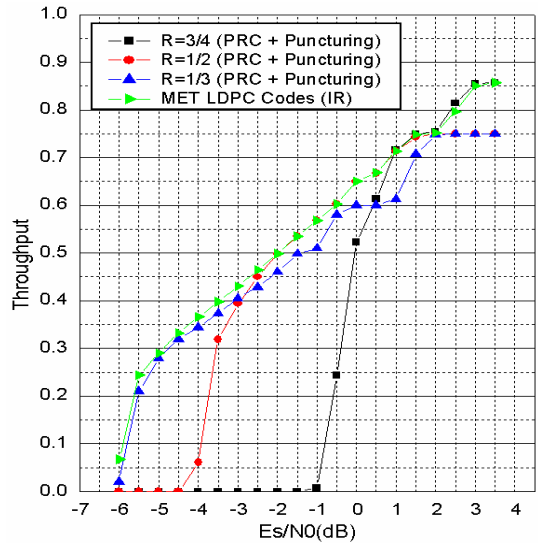


그림 5. III절과 IV절에서 제안된 기법을 사용하는 HARQ 시스템의 정보처리량

을 지원하는 다선분형 LDPC 부호를 이용한 HARQ 시스템은 요구되는 정보처리량이 높을 때에는 천공과 PRC 기법을 사용하는 HARQ 시스템과 유사한 성능을 보였고, 요구되는 정보처리량이 낮은 경우에는 더 우수한 성능을 보였다. 이는 Raptor 구조로 설계된 낮은 부호율의 다선분형 LDPC 부호의 성능이 통상적인 LDPC 부호의 성능보다 우수함에 기인한다^[7]. 또한, Raptor 구조의 다선분형 LDPC 부호는 단일 패리티 검사 부호를 연결하는 방식으로 확장되므로 부호화 과정이 간단하다는 장점이 있다.

참고로 반복 복호 횟수를 50회 보다 크게 설정하면 천공을 적용한 경우가 PRC 기법을 적용한 경우보다 성능 개선 폭이 크기 때문에, 그림 5에서 나타나는 정보처리량 곡선의 교차점이 SNR이 증가하는 방향으로 이동하게 된다.

VI. 결론

본 논문에서는 소수의 패리티 검사 행렬에 천공과 PRC 기법을 적용하여 넓은 범위의 정보처리량을 지원하는 HARQ 시스템을 제안하였다. 또한, 다선분형 LDPC 부호를 이용하여 간단하게 IR 기법을 지원하면서, 우수한 정보처리량을 얻을 수 있는 HARQ 시스템을 제안하였다. 시스템에서 요구되는 정보처리량과 복호 복잡도 등을 기준으로 기법을 적절히 선택하면 효율적인 HARQ 시스템을 구현할 수 있음을 전산 실험을 통해서 검증하였다.

참 고 문 헌

- [1] R. G. Gallager, Low-Density Parity-Check Codes. Cambridge, MA: MIT Press, 1963.
- [2] M. Tanner, "A recursive approach to low complexity codes," *IEEE Trans. Inform. Theory*, Vol.27, No.5, pp. 533-547, Sep. 1981.
- [3] T. J. Richardson, A. Shokrollahi, and R. Urbanke, "Design of capacity-approaching low-density parity-check codes," *IEEE Trans. Inform. Theory*, Vol.47, pp. 619-637, Feb. 2001.
- [4] S. Y. Chung, G. D. Forney, T. J. Richardson, and R. Urbanke, "On the design of low-density parity-check codes within 0.0045dB of the Shannon limit," *IEEE commun. Lett.*, Vol.5, No.2, pp. 58-60, Feb. 2001.
- [5] J. Ha, J. Kim, D. Kline, and S. W. McLaughlin, "Rate-compatible punctured low-density parity-check codes with short block lengths," *IEEE Trans. Inform. Theory*, Vol.52, No.2, pp. 728-738, Feb. 2006.
- [6] 양현구, 양경철 "채널 추정 오류가 LDPC 부호의 성능에 미치는 영향 분석," 제 15회 통신정보합동학술대회(JCCI'05) 논문집, 제 15권, TM13-6. 1-5, 대구, 2005년 4월.
- [7] T. J. Richardson and R. Urbanke, "Multi-edge type LDPC codes," to appear in *IEEE Trans. Inform. Theory*, Available: <http://lthcwww.epfl.ch/papers/multiedge.ps>

안 석 기 (Seok-Ki Ahn)

준회원



템, 부호이론

2006년 2월 포항공과대학교 전자전기공학과 학사
 2008년 2월 포항공과대학교 전자전기공학과 석사
 2008년 3월~현재 포항공과대학교 전자전기공학과 박사 과정
 <관심분야> 광대역 통신 시스템, 부호이론

명 세 호 (Seho Myung)

준회원



2001년 2월 KAIST 전자전기공학과 학사
 2003년 2월 포항공과대학교 전자전기공학과 석사
 2006년 2월 포항공과대학교 전자전기공학과 박사
 2006년 3월~2007년 3월 포항공과대학교 정보통신연구소 박사 후 연구원
 2007년 4월~현재 삼성전자 통신 연구소 책임연구원
 <관심분야> 부호 이론, 다중 안테나, 디지털 통신

양 경 철 (Kyeongcheol Yang)

중신회원



1986년 2월 서울대학교 전자공학과 학사
 1988년 2월 서울대학교 전자공학과 석사
 1992년 12월 University of Southern California 전기 공학과 박사
 1993년 3월~1999년 2월 한양대학교 전자통신공학과 조교수
 1999년 2월~현재 포항공과대학교 전자전기공학과 교수
 <관심분야> 디지털 통신, 부호이론, 다중 안테나 시스템, 신호설계, 정보보호