

LDPC 코드와 터보 코드의 성능 상향 한계 분석

정회원 정 규 혁*

Analysis of Bounding Performance for LDPC codes and Turbo-Like Codes

Kyuhyuk Chung* *Regular Member*

요 약

본 논문은 특정한 LDPC 코드와 특정한 인터리버를 가진 터보 코드의 맥시멈 라이클리후드(maximum-likelihood) 디코딩 성능의 상향 한계를 보인다. 현재까지의 연구는 균등 인터리버의 가정을 하거나 또는 앙상블 코드를 사용하여 LDPC 코드와 터보 코드의 성능 상향 한계를 계산하였다. 이러한 성능 상향 한계는 모든 코드 또는 모든 인터리버에 대한 평균 성능만을 표시하게 된다. 제안된 성능 상향 한계는 단순 한계(simple bound)와 정확한 짧은 거리의 항들을 포함하는 추정된 무게 분포를 기초하고 있다. 만약 둘 중에 하나만 사용하게 되면 정확한 성능 상향 한계를 얻을 수 가 없다.

Key Words : 성능 상향 한계, LDPC 코드, 터보 코드, 무게 분포, 단순 한계(simple bound), 균등 분포 가정

ABSTRACT

We present upper bounds for the maximum-likelihood decoding performance of particular LDPC codes and turbo-like codes with particular interleavers. Previous research developed upper bounds for LDPC codes and turbo-like codes using ensemble codes or the uniformly interleaved assumption, which bound the performance averaged over all ensemble codes or all interleavers. Proposed upper bounds are based on the simple bound and estimated weight distributions including the exact several smallest distance terms because if either estimated weight distributions on their own or the exact several smallest distance terms only are used, an accurate bound can not be obtained.

1. 서 론

최근 통신 이론에 있어서 Low Density Parity Check(LDPC) 코드와 인터리버를 가지는 조합 코드들을 위한 반복 복호는^[1-6] 탁월한 성능 때문에 크나큰 진보를 이루고 있다. 병렬 조합 코드(또는 터보 코드)와 직렬 조합 코드는 하나의 인터리버를 통해 병렬 또는 직렬로 연결된 간단한 이진 길쌈 코드로 구성되어 있다^[3, 4, 7, 8]. 한편, LDPC 코드는^[1, 2] 탁월한 성능과 하드웨어 구현의 용이성 때문에 많

은 연구가 진행되고 있다. 다수의 모의실험과 성능 한계들이 이러한 코드들의 탁월한 성능을 입증 해 주고 있다^[10-18].

한 논문에서는^[19] 트랜스퍼 함수(transfer function) 기술을 적용하여 유사 무작위(pseudo-random) 인터리버를 가지는 터보 코드의 맥시멈 라이클리후드 성능의 비트 오류율과 워드 오류율의 상향 한계를 구하였다. 특정 인터리버에 대해 유니온 한계(union bound)를 구하는 것이 거의 불가능하기 때문에 균 등 분포 인터리버 가정을 기초하여 무작위 코딩 한

* 단국대학교 정보컴퓨터학부 (khchung@dku.edu)
 논문번호 : KICS2006-01-006, 접수일자 : 2006년 1월 3일

계(random coding bound)로서 트랜스퍼 함수(transfer function) 한계가 유도되었다. 이러한 가정하에서는 모든 가능한 인터리버의 퍼뮤테이션(permutation)에 대한 평균된 성능에 대한 상향 한계가 유도된다. 그러므로 트랜스퍼 함수(transfer function) 한계는 특정한 인터리버에 대한 터보 코드의 성능 한계를 구할 수는 없다.

유니온 한계(union bound)가 컷오프 레이트 이상의 성능을 예측하는 것이 어렵기 때문에 컷오프 레이트 이상의 레이트에서 유용한 성능 한계에 대한 요구가 커지게 되었다. 이러한 성능 상향 한계 중에 하나가 단순 한계(simple bound)이다. 한 논문에서는^[20] 단순 한계(simple bound)가 균등 분포 인터리버의 가정을 하고 LDPC 코드와 터보 코드에 사용되었다. 그러므로 특정한 LDPC 코드나 터보 코드의 맥시멈 라이클리후드(maximum-likelihood) 복호 성능은 여전히 구하여지지 않았다. 반복 복호를 사용한 LDPC 코드나 터보 코드의 모의실험 성능은 최적이지 않음을 주의해야 한다. 왜냐하면 반복 복호는 최적 성능의 근사치이기 때문이다. 한편 모든 한계 기법들은 최적 성능에 대한 계산이다^[21, 22].

본 논문에서는 근사화된 입출력 무게 분포를 사용하여 특정 인터리버를 가지는 터보 코드나 특정한 LDPC 코드에 대한 성능 상향 한계를 구하였다. 터보 코드의 성능은 몇 개의 영이 아닌 최소의 거리 항들만을 포함하는 유니온 한계(union bound)에 의해서 높은 신호대 잡음비에서는 잘 근사화가 된다^[21, 23]. 한 논문에서는^[23] 브랜치 앤 바운드 알고리즘이^[24] 터보 코드와 직렬 조합 길쌈 코드(Serially Concatenated Convolutional Code(SCCC))의 최소 거리항과 몇 개의 짧은 거리항들을 구하는 데 사용되었다. 한 알고리즘은^[25] LDPC 코드의 최소 거리항을 계산하였다. 본 논문에는 이렇게 계산된 정확한 짧은 거리항들을 근사화된 거리 분포 안에 포함시키었다. 왜냐하면 근사화된 거리 분포만을 사용하거나 짧은 거리항들만 사용하면 정확한 한계를 얻을 수 없기 때문이다. 특정한 LDPC 코드와 터보 코드의 특정 인터리버는 정확한 짧은 항들의 계산과 근사화된 무게 분포를 계산하는 데 고려되었다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. II 장에서는 이전의 한계 기법들을 설명하고 트랜스퍼 함수(transfer function) 한계와 단순 한계(simple bound) 그리고 모의실험 결과를 비교하였다. III 장에서는 특정 LDPC 코드와 특정 인터리버를 가진 터보 코드의 성능 상향 한계가 소개된다. IV 장에서 본 논

문을 결론을 맺는다.

II. 기존의 한계들의 설명 및 비교

2.1 트랜스퍼 함수(Transfer Function) 한계
 맥시멈 라이클리후드(maximum-likelihood) 복호기에 대해 Additive White Gaussian Noise(AWGN) 채널의 비트 오류율과 워드 오류율의 유니온 한계(union bound)는 입출력 무게 분포를 필요로 한다. 코드 레이트 $r = K/N$ 인 전체 (N, K) 코드 C 에 대해 $A_{w,d}$ 를 입력 무게가 w 이고 출력 무게가 d 인 코드 워드의 개수로 나타낸다. 이때 입력 무게가 w 이 주어지고 출력 무게가 d 인 코드워드를 생성하는 조건 확률은 다음과 같다.

$$p(d|w) = \frac{A_{w,d}}{\sum_d A_{w,d}} = \frac{A_{w,d}}{\binom{K}{w}} \quad (1)$$

대개 터보 코드에 대한 조건 확률 분포 $p(d|w)$ 는 균등 분포(uniformly interleaved) 가정을 사용하여 구하여진다^[19]. 터보 코드에 대한 트랜스퍼 함수(transfer function) 한계의 발산 특성이 컷오프 레이트를 넘을 때 관찰되어진다^[19].

2.2 단순 한계(Simple Bound)

터보 계통의 코드들의 성능은 상당히 큰 블록 길에서 Shannon의 채널 한계에 근접하다. 그래서 컷오프 레이트 이상의 레이트에서 유용한 성능 한계에 대한 필요성이 증대되었다. 블록 코드의 복호 성능에 대한 그러한 단순 한계(simple bound)가^[20] 완성 형태로 구해졌다. 이 성능 한계는 간단한데 그 이유는 그 최종 단계에서 적분이나 최적화를 요하지 않는다는 것이다. 코드 레이트 $r = K/N$ 인 선형이진 (N, K) 블록 코드 C 를 가정한다. 주어진 코드에 대해 d 는 코드워드의 Hamming 무게이다. 이때 맥시멈 라이클리후드(maximum-likelihood) 복호의 경우 비트 오류율에 대한 상향 한계는 다음과 같다.

$$P \leq \sum_{d=d_{\min}}^{N-K+1} \min\{e^{-nEb_c/d}, e^{ng(\delta)} Q(\sqrt{2ch})\}$$

여기서

$$\text{만약 } q_0(\delta) < c < \frac{e^{2g(\delta)} - 1}{2\delta(2-\delta)} \text{ 이면}$$

$$E(c, d) = \frac{1}{2} \ln [1 - 2c_0(\delta) f(c, d)] + \frac{cf(c, \delta)}{1 + f(c, \delta)}$$

이고 그렇지 않을 경우엔

$$E(c, d) = -g(\delta) + \delta c,$$

$$\delta = d/N, \quad c = R_c(E_b/N_0) \quad \text{그리고} \quad f(c, \delta) = \sqrt{\frac{c}{c_0} + 2c + c^2}$$

$-c-1$ 이다. 그리고 $g(\delta) = \frac{1}{N} \ln \left\{ \sum_w \frac{w}{K} A_{w,d} \right\}$ 로 나타내지며 여기서 $A_{w,d}$ 는 입출력 무게 분포이다. 구체적으로 $A_{w,d}$ 는 입력 Hamming 무게가 w 이고 코드 워드의 Hamming 무게가 d 인 코드워드의 개수를 의미한다. 그러나 단순 한계(simple bound)는 입출력 무게 분포 $A_{w,d}$ 를 필요로 한다.

2.3 트랜스퍼 함수(Transfer Function) 한계와 단순 한계(Simple Bound)와 모의실험 결과의 비교

그림 1은 균등 인터리버 가정을 사용한 트랜스퍼 함수(transfer function) 한계와 단순 한계(simple bound)를 다양한 인터리버들에 대한 모의실험 결과들과 비교하고 있다. 사용된 터보 코드는 생성 다항식 $(1+D)/(1+D+D^2)$ 을 가지는 구성 길쌈 코드를 사용하였다. 터보 코드의 레이트는 1/3이다. 세 가지의 시뮬레이션 결과는 길이 $K=1000$ 인 세 가지의 다른 인터리버로부터 얻은 결과들이다. 첫 번째는 최적화된 확산 인터리버인데 셋 중 가장 좋은 성능을 나타내고 있다^[26]. 둘째는 20행 50열의 직사각배열을 행단위로 읽어 들이고 열 단위로 읽어 내는 인터리버이다. 세 번째 인터리버는 200행 50행의 직사각배열을 사용하였다. T트랜스퍼 함수(transfer function) 한계와 단순 한계(simple bound)는 균등 인터리버 가정을 사용하였는데 이럴 경우 단 하

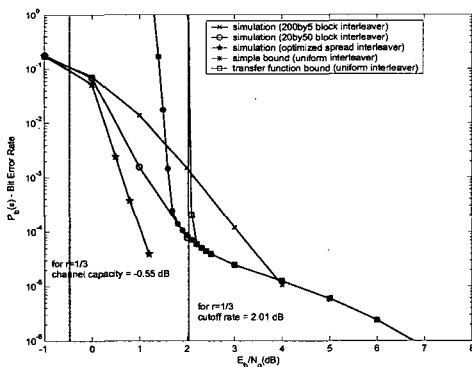


그림 1. 균등 인터리버의 상향 한계와 터보 코드의 다양한 인터리버에 대한 시뮬레이션($r=1/3, K=1000$)

나의 한계만이 구해지는 것을 알 수 있다. 그러나 시뮬레이션 결과는 특정 인터리버에 성능이 달라지는 것을 알 수 있다. 한가지 주목할 점은 반복 복호 자체가 최적이지 아니기 때문에 반복 복호의 성능은 맥시멈 라이클리후드(maximum-likelihood) 복호 성능의 상향 한계보다도 안 좋을 수 있다. 비트 오류률이 0.1인 지점에서 단순 한계(simple bound)가 트랜스퍼 함수(transfer function) 한계보다 대략 0.7 dB정도 밀접하다는 것을 알 수 있다. 트랜스퍼 함수(transfer function) 한계는 컷오프 레이트 위에서는 발산한다는 사실은 잘 알려져 있다. 코드를 1/3에서의 컷오프 레이트는 $E_b/N_0=2.01$ dB이다.

2.3 Truncated Union 한계

선형이진 코드 $C(N, K)$ 가(N 은 코드워드 길이이고 K 는 정보 길이) free distance d_{free} 를 가질 때 N_{free} 는 그 개수를 나타낸다. 다시 말해 d_{free} 의 무게를 가지는 코드워드의 개수이다. 정보 bit의 개수 w_{free} 는 d_{free} 무게의 코드워드를 생성하는 N_{free} 개의 정보 블록들의 Hamming 무게의 합을 나타낸다. 매우 높은 E_b/N_0 의 값들에 대해(E_b 는 정보 bit당 에너지이고 N_0 는 일 방향 잡음 spectral density) 비트 오류률(Bit-Error Rate(BER))은 다음과 같은 쓸 수 있다.

$$BER \approx \frac{w_{free}}{K} Q \left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0} \frac{K}{N} d_{free}} \right) \quad (2)$$

터보 코드의 경우 거리 분포의 다른 항들을 추가 함으로서 더 나은 근사치를 얻을 수 있다^[23]. $UB(j)$ 를 j 번째 영이 아닌 거리항들까지만 포함한 유니온 한계(union bound)의 수식으로 나타낼 때 다음과 같다.

$$UB(j) = \sum_{i=1}^j \frac{w(i)}{K} Q \left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0} \frac{K}{N} d(i)} \right) \quad (3)$$

여기서 $d(i)$ 는 i 번째 영이 아닌 거리를 $N(i)$ 과 $w(i)$ 는 그 개수를 나타낸다. 한 논문에서는^[23] 브랜치 앤 바운드 알고리즘이^[24] 터보 코드와 직렬 조합 길쌈 코드(Serially Concatenated Convolutional Code (SCCC))의 최소 거리항과 몇 개의 짧은 거리항들과 그 개수를 구하기 위해 사용되었다. 그래서 터보 코드나 직렬 조합 길쌈 코드의 성능을 높은 SNR에서 부분 생략 유니온 한계(truncated union bound)를 이용해 근사화하는 것이 가능해졌다. 그러나 이러한 알고리즘들은 브랜치 앤 바운드 방법을 사용

하여 전체의 모든 무게 분포를 구하는 것은 현실적으로 불가능하다.

$$\widehat{A}_{w,d} = \left(\frac{K}{w}\right) \frac{k}{N_s} \quad (7)$$

III. 특정한 LDPC 코드와 특정 인터리버의 터보 코드의 성능 상향 한계

단순 한계(simple bound)는 복호 오류율의 상향 한계에 대한 가장 정형화된 수식이다^[20]. 본 논문에서는 특정 LDPC코드와 특정 인터리버의 터보 코드에 대해 단순 한계(simple bound)를 사용한다. 단순 한계(simple bound)를 사용하기 위해서는 조건 확률 $p(dw)$ 이 필요하다. 그러나 계산량 때문에 $p(dw)$ 를 얻는 것은 현실적으로 불가능하다. 그래서 본 논문에서는 $p(dw)$ 의 맥시멈 라이클리후드(maximum-likelihood) 추정치 p_{MLE} 를 계산하였다. k 를 binomial 확률 변수라 할 때 확률 무게 함수는 다음과 같다.

$$P(k|p) = \binom{N_s}{k} p^k (1-p)^{N_s-k} \quad (4)$$

여기서 N_s 는 시행 횟수이고 p 는 시행 확률이고 $k=0, 1, \dots, N_s$ 이다. 맥시멈 라이클리후드(maximum-likelihood) 추정치 p_{MLE} 를 얻기 위해 likelihood 함수 $P(k|p)$ 를 최대화한다.

$$\begin{aligned} \widehat{p}_{MLE} &= \max_p P(k|p) \\ &= \max_p \binom{N_s}{k} p^k (1-p)^{N_s-k} \end{aligned} \quad (5)$$

다음 미분하고 결과를 0으로 하면 해를 구할 수 있다.

$$\widehat{p}_{MLE} = \frac{k}{N_s} \quad (6)$$

여기서 해가 전체 최댓값임을 증명하는 것은 자명하다. 우리는 여기서 \widehat{p}_{MLE} 로 $p(dw)$ 를 근사화한다. 그러면 다음과 같은 값을 얻는다.

$$\begin{aligned} p(dw) &\approx \widehat{p}_{MLE} \\ \frac{A_{w,d}}{\binom{K}{w}} &\approx \frac{k}{N_s} \\ \frac{\widehat{A}_{w,d}}{\binom{K}{w}} &= \frac{k}{N_s} \end{aligned}$$

여기서 $\widehat{A}_{w,d}$ 는 추정된 무게 분포이다. 우리는 $N_s=10000$ 을 사용하였는데 그 이유로는 $N_s=1000, 10000$ 그리고 100000 에서 단순 한계(simple bound)의 임계값이 비슷하기 때문이다. $\widehat{A}_{w,d}$ 를 얻기 위해 각각의 입력 무게 w 에 대해 먼저 무작위로 $N_s=10000$ 개의 코드 워드를 생성한다. 다음 생성된 코드 워드들로부터 k 를 계산하고 (7)식을 사용하여 $\widehat{A}_{w,d}$ 를 얻는다. 몇 개의 짧은 거리항들에 대해서는 정확한 분포를 계산하여^[23] $\widehat{A}_{w,d}$ 에 추가하였다. 왜냐하면 높은 신호대 잡음비에서는 이러한 항들이 중요하기 때문이다. 여기서 주목할 점은 터보 코드의 특정한 인터리버가 짧은 거리항을 구하는 데에도 고려되었을 뿐 아니라 근사 무게 분포를 구하는 데에도 고려되었다. 그림 2에서는 세 가지 경우를 비교하였는데 첫째는 정확한 짧은 거리항들만 사용하였을 때이고 둘째는 근사 무게 분포만이 사용되어졌을 경우이고 그리고 셋째는 위의 두 가지를 동시에 사용한 경우이다. 그림 2에서 보여주듯이 두 가지를 동시에 사용할 때 더 정확한 한계를 구할 수 있음을 알 수 있다.

그림 3에서는 세 가지 인터리버에 대해 시뮬레이션 성능과 정확한 몇 개의 짧은 거리항을 포함한 근사화된 무게 분포를 사용한 단순 한계(simple bound)를 비교하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 각각의 인터리버에 대해 정확한 성능 상향 한계를 구할 수 있음을 알 수 있다. 또한 낮은 신호대 잡음비에서 단순 한계(simple bound)의 임계점이 대략 레이

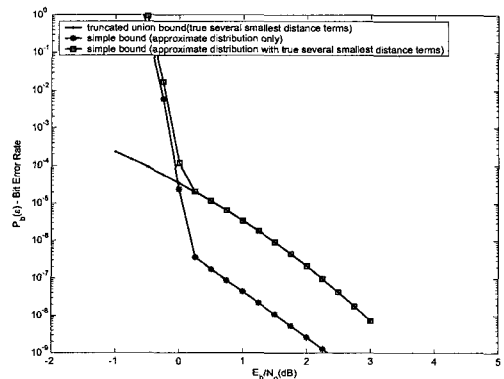


그림 2. 정확한 짧은 몇 개항의 경우와 근사분포만의 경우와 두 가지 모두를 포함한 경우의 상향 한계의 비교(optimized spread interleaver의 터보 코드, $r=1/3$, $K=1000$)

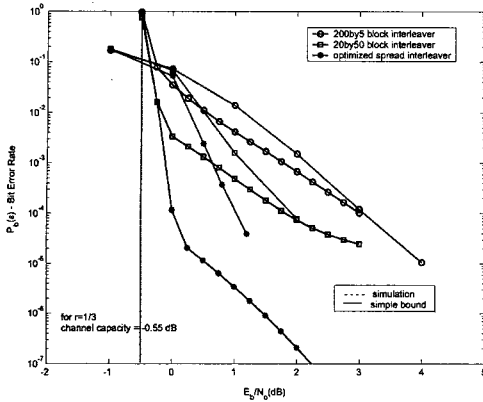


그림 3. 다양한 인터리버의 터보 코드에 대한 정확한 짧은 몇 개의 항을 포함한 근사분포를 사용한 심플 한계들과 반복 복호 시뮬레이션 성능들($r=1/3, K=1000$)

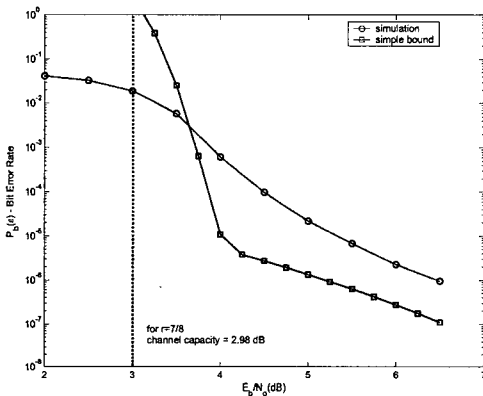


그림 4. LDPC 코드에 대한 정확한 최소항을 포함한 근사분포를 사용한 심플 한계와 반복 복호 시뮬레이션 결과($r = 7/8; (N; K) = (800; 700)$)

IV. 결론

본 논문에서는 특정 LDPC 코드와 특정 인터리버의 터보 코드의 성능 상향 한계를 연구하였다. 이러한 한계들은 코드들의 최적 성능을 추정하는 것을 가능하게 하는데 최적 성능은 최적 복호가 아닌 반복 복호의 성능보다 더욱 좋다. 본 상향 한계의 분석을 통해 앞으로 최적 복호를 위한 방법을 연구하는 것이 필요로 된다.

참고 문헌

[1] R. Gallager, "Low Density Parity Check Codes," MIT press, 1963.
 [2] D. J. C. MacKay, "Good error-correcting codes based on very sparse matrices," *Electronic Letters*, vol. 33, pp. 457-458, March

1997.
 [3] C. Berrou and A. Glavieux, "Near optimum error correcting coding and decoding: turbo-codes," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 44, pp. 1261-1271, October 1996.
 [4] S. Benedetto, D. Divsalar, G. Montorsi, and F. Pollara, "Serial concatenation of interleaved codes: performance analysis, design, and iterative decoding," *IEEE Trans. Inform. Theory*, pp. 909-926, May 1998.
 [5] L. R. Bahl, J. Cocke, F. Jelinek, and J. Raviv, "Optimal decoding of linear codes for minimizing symbol error rate," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. IT-20, pp. 284-287, March 1974.
 [6] N. Wiberg, Codes and Decoding on General Graphs(Ph.D. Thesis). PhD thesis, Linkoping University(Sweden), 1996.
 [7] D. Divsalar and F. Pollara, "Turbo codes for deep-space communications," *TDA Progress Rep.*, vol. 42-120, pp. 29-39, February 1995.
 [8] S. Benedetto and G. Montorsi, "Design of parallel concatenated convolutional codes," *IEEE Trans. Commun.*, pp. 591-600, May 1996.
 [9] S. Benedetto and G. Montorsi, "Unveiling turbo codes: some results on parallel concatenated coding schemes," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 42, pp. 408-428, March 1996.
 [10] T. J. Richardson and R. L. Urbanke, "The capacity of low-density parity-check codes under message-passing decoding," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 47, pp. 599-618, February 2001.
 [11] T. J. Richardson, M. A. Shokrollahi, and R. L. Urbanke, "Design of capacity-approaching irregular low-density paritycheck codes," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 47, pp. 619-637, February 2001.
 [12] S. Y. Chung, T. J. Richardson, and R. L. Urbanke, "Analysis of sum-product decoding of low-density parity-check codes using a gaussian approximation," *IEEE Trans.*

- Inform. Theory*, vol. 47, pp. 657-670, February 2001.
- [13] S. Y. Chung, G. D. Forney, T. J. Richardson, and R. L. Urbanke, "On the design of low-density parity-check codes within 0.0045 db of the shannon limit," *Communication letters*, vol. 5, pp. 58-60, February 2001.
- [14] T. M. Duman and M. Salehi, "New performance bounds for turbo codes," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 46, pp. 565-567, May 1998.
- [15] T. M. Duman and M. Salehi, "Performance bounds for turbo-coded modulation systems," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 47, pp. 511-521, April 1999.
- [16] G. Poltyrev, "Bounds on the decoding error probability of binary linear codes via their spectra," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 40, pp. 1284-1292, July 1994.
- [17] I. Sason and S. Shamai, "Improved upper bounds on the decoding error probability of parallel and serial concatenated turbo codes via their ensemble distance spectrum," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 46, pp. 24-47, January 2000.
- [18] A. M. Viterbi and A. J. Viterbi, "Improved union bound on linear codes for the input-binary awgn channel with applications to turbo codes," *Proc. IEEE Symposium on Information Theory*, p. 29, August 1998.
- [19] D. Divsalar, S. Dolinar, and F. Pollara, "Transfer function bounds on the performance of turbo codes," *TDA Progress Reports* 42-122., Jet Propulsion Lab, August 1995.
- [20] D. Divsalar, "A simple tight bound on error probability of block codes with application to turbo codes," *TMO Progress Reports* 42-139., Jet Propulsion Lab, November 1999.
- [21] L. Perez, J. Seghers, and D. Costello, "A distance spectrum interpretation of turbo codes," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 42, pp. 1698-1709, November 1996.
- [22] S. Benedetto, L. Gaggero, R. Garello, and G. Montorsi, "On the design of binary serially concatenated convolutional codes," in *Proc. International Conf. Communications*, (Vancouver, B.C., Canada), pp. 32-36, 1999. (Comm. Theory Mini-Conf.).
- [23] R. Garello, P. Pierleoni, and S. Benedetto, "Computing the free distance of turbo codes and serially concatenated codes with interleavers: Algorithms and applications," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 19, pp. 800-812, May 2001.
- [24] E. Horowitz and S. Sahni, *Fundamentals of Computer Algorithms*. Computer Science Press, 1978.
- [25] K. Chung and J. Heo, "Computing the minimum distance of ldpc codes and ra codes." submitted to IEICE Trans. Commun.
- [26] S. Crozier, "New high-spread high-distance interleavers for turbo-codes," *20th Biennial Symposium on Communications*, Kingston, Ontario, Canada, pp. 3-7, May 2000.

정규혁 (Kyuhyuk Chung)

정회원



1997년 2월 성균관대학교 전자공학과 졸업

1998년 12월 University of Southern California 전기공학과 석사

2003년 12월 University of Southern California 전기공

학과 박사

1999년 8월~2000년 5월 미국 Integrated Device Technology, Inc., Member of Technical Staff

2001년 5월~2002년 5월 미국 TrellisWare Technology, Inc., Senior Engineer

2004년 2월~2005년 8월 LG전자 이동통신기술연구소 표준화그룹 선임연구원

2005년 9월~현재 단국대학교 정보컴퓨터학부 전임강사
<관심분야> Channel Coding, Iterative Detection, IEEE 802.16e LDPC code, Mobile Internet, Contents Technologies(CT)