

## 수중통신채널에서 다중경로 극복을 위한 오류정정부호에 대한 연구

김남수\* · 김민혁\*\* · 박태두\*\*\* · 김철승\*\*\*\* · 정지원†

(원고접수일 : 2008년 4월 22일, 원고수정일 : 2008년 7월 31일, 심사완료일 : 2008년 11월 3일)

### The Study about Channel code to Overcome Multipath of Underwater Channel

Nam-Soo Kim\* · Min-Hyuk Kim\*\* · Tae-Doo Park\*\*\* · Chul-Seung Kim\*\*\*\* and Ji-Won Jung†

**Abstract :** Underwater acoustic communication has multipath error because of reflection by sea-level and sea-bottom. The multipath of underwater channel causes receive signal to make error floor. In this paper, we propose the underwater communication system using various channel coding schemes such as RS coding, convolutional code, turbo code and concatenated code for overcoming the multipath effect in underwater channel. As shown in simulation results, characteristic of multipath error is similar to that of random error. So interleaver has not effect on error correcting. For correcting of error floor by multipath, it is necessary to use strong channel codes like turbo code. Turbo code is one of the iterative codes. And the performance of concatenated codes including RS code has better performance than using singular channel codes.

**Key words :** Underwater acoustic channel(수중 음파 채널), Multipath(다중경로), RS coding (리드-솔로몬 코드), Turbo code(터보 코드), Concatenated code(연접 부호)

### 1. 서 론

수중 음향 통신 시스템은 과거 군사적 목적을 위해 제한적으로 사용되었다. 수중 음원 탐지나 수중 운동체 추적, 잠수함등과의 통신을 위해 주로 연구되었으나 해양에 관한 관심이 고조되고, 해양 탐사나 해저 자원 탐사가 활발해지면서 그 활용분야가 확대되었다. 하지만 국내의 기술 수준은 해양산업 기술의 수요 부족으로 인하여 수중통신 시스템의

개발은 미미한 수준이다.

수중에서 전파는 급격한 감쇠특성을 갖기 때문에 수중에서의 무선통신에는 음파를 이용하여 통신을 하게 된다. 이러한 이유로 수중에서의 무선통신 시스템 연구는 수중음향학과 통신기술의 복합기술로 연구가 이루어지는 분야이다.

음성 채널의 경우 전달 과정에서 잔향 및 다중경로 등에 의해 크게 왜곡되며, 수중에서 고속 데이터 전송을 위하여 수중 음향 통신 채널 특성을 결

† 교신저자(한국해양대학교 전파공학과, E-mail:jwjung@hhu.ac.kr, Tel:051-410-4424)

\* 한국해양대학교 전파공학과

\*\* 한국해양대학교 전파공학과

\*\*\* 한국해양대학교 전파공학과

\*\*\*\* 한국해양대학교 전파공학과

정하는 해면, 해저, 수심 등의 시공간 변화에 의한 다중경로 특성이나 도플러 확산이 시스템의 설계에 고려되어야 한다.

특히 천해에서의 다중경로는 해면의 시변 산란에 의해 도플러 확산파가 직접파에 혼합되어 통신 채널의 특성을 좌우하게 된다. 이러한 음향 채널 특성의 시공간적인 변화는 디지털 수중음향 통신에서 송신하는 심벌간의 상호간섭(Inter-Symbol Interference : ISI)을 야기하여 통신 시스템의 성능을 저하시키게 된다. 따라서 이러한 비선형 복합 채널을 가지는 수중통신에서, 시간에 따라 채널의 특성이 매우 빠르게 변하는 시변 특성을 가지는 채널이므로, 신뢰성이 강한 오류정정부호의 적용이 필수적이다<sup>[1][2][3]</sup>.

이에 본 논문에서는 무선통신시스템에서 사용되고 있는 여러 가지 채널 부호를 적용하여 일반 지상 무선 통신 환경과는 다른 수중채널환경에서 오류정정부호의 효과를 시뮬레이션을 통해 그 결과를 분석하였으며, 최적의 채널 부호화 방식을 선정하였다.

본 연구에서 고려되어지는 오류정정부호 알고리즘으로는 기존 수중통신에서 고려되는 컨벌루션 부호 및 RS 부호, RS 부호와 컨벌루션 부호를 연결시킨 연결부호를 기본으로 성능 분석하였다. 또한 기존의 성능과 비교분석하기 위해 향후 고려되는 반복부호 중의 하나인 터보부호를 적용하여 성능 분석하였다.

## 2. 채널모델링

본 논문에서는 [4]에서 제시한 국립수산과학원 4월 수온 자료를 이용하여 SVP (Sound Velocity Profile)를 얻었다. 이 자료를 Ray theory을 이용하여 수중통신채널을 시뮬레이션 하였다. Fig. 1에서는 보는 것과 같이 송신단과 수신단 사이의 거리는 1Km, 송신단 수심은 50m, 수신단 수심은 100m로 가정하였다.

또한 Table 1은 시뮬레이션 결과 값이며, 이들 값을 이용하여 신호세기를 정규화 하였다.

Fig. 2는 수신단에 순차적으로 들어온 eigenray

의 정규화된 신호세기를 나타낸다.

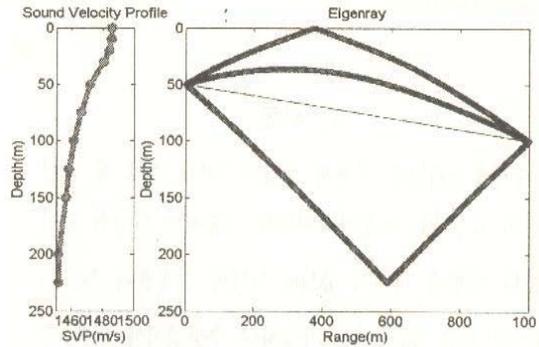


Fig. 1 SVP and eigenray of East sea (April)

Table 1 Eigenray result of East sea (April)

Number	Arrival Time	Top Bonks	Bottom Bonks	Length	Arrival Amplitude	Normalized Amplitude
1	0.68216	0	0	1003.9	0.001361	0.7353467
2	0.68469	1	0	1011.7	0.0007028	0.3797220
3	0.71655	0	1	1044.1	0.0010389	0.5613165

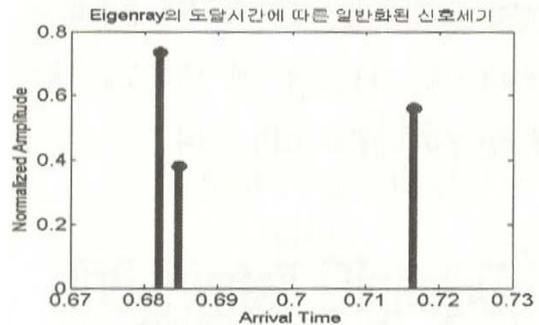


Fig. 2 Amplitude and arrival time of eigenray

## 3. 수중채널에 고려되어지는 오류정정부호

### 3.1 터보부호

1993년 Berrou등에 의해 제안된 터보부호는 Eb/No가 0.7dB, 부호율 1/2에서 비트오류율  $10^{-5}$ 의 성능을 보였다. 초기에는 긴 프레임에 따른 복호 지연 등으로 인한 실시간 처리의 어려움으로

우주통신용으로 연구되었으나 최근에는 IMT-2000에서 높은 데이터 전송의 오류정정부호로 ITU(International Telecommunication Union)에 의해 제안되고 있다<sup>[5]</sup>.

터보부호는 연관성 입/출력(soft-in/soft-out)이 가능하고, 정보신호에 대해서 서로 다른 인터리버에 의해 분리된 2개 이상의 구성코드들이 병렬연접(parallel concatenation)된 구성을 하고 있다. 이러한 구성코드의 복호기로는 SOVA(Soft Output Viterbi Algorithm), MAP, Sub-MAP 복호기등이 있는데, 채널의 잡음분산평가가 필요하다는 단점이 있지만 일반적으로 성능이 우수한 MAP을 사용한다.

터보부호의 기본개념은 선행하는 구성코드의 복호기 연관성 출력을 다시 나머지 복호기에 입력하고 이러한 과정을 반복함으로써 향상된 성능을 가능하게 하는 것이다. Fig. 3과 Fig. 4는 각각 터보부호의 부호기와 복호기를 나타내었다.

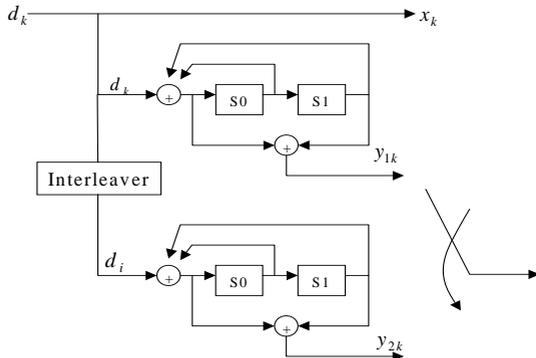


Fig. 3 Encoder structure of turbo code

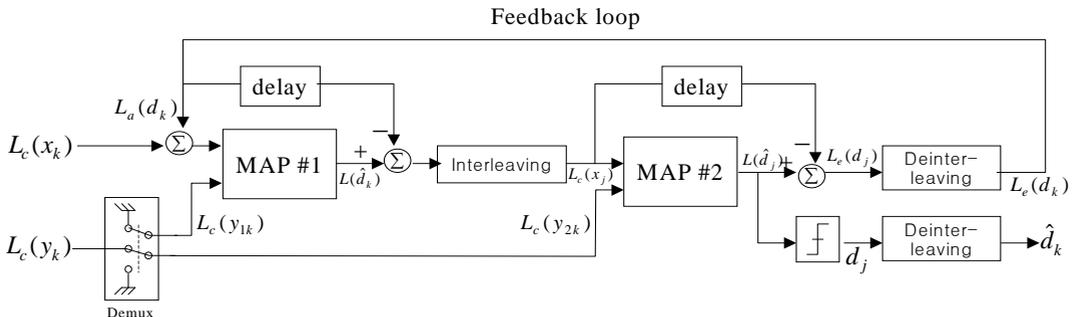


Fig. 4 Decoder structure of turbo code

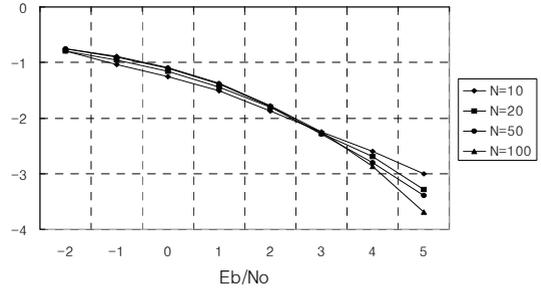


Fig. 5 Turbo code performance by block size

Fig. 5는 MAP복호기의 시뮬레이션 결과이다. N은 복호블럭의 크기를 의미하며, 3dB이하 일 때는 N의 크기에 영향을 받지 않지만, 그 이상의 값에서는 N이 클수록 성능이 좋은 것을 알 수 있다.

### 3.2 연접부호 시스템(Concatenated coding system)

연접부호는 원하는 오류 성능을 구하기 위하여 내부부호(inner code)와 외부부호(outer code)의 두 레벨의 부호화를 수행하는 부호이다. Fig. 6은 연접부호 시스템의 블록도를 나타낸 그림이다.

내부부호가 대부분의 채널 오류를 정정하도록 하고, 높은 부호율을 가진 외부부호는 오류 확률을 정해진 수준까지 낮추는 기능을 하게 된다. 그리고 두 부호화 단계 사이에는 인터리버가 있는데 이는 대개 내부 부호화 과정의 출력에 나타날 수 있는 연접 오류를 펼쳐주기 위해 필요하다. 이러한 연접 부호를 사용하는 주된 이유는 단일 부호를 사용한 경우보다 전체 구현 복잡도는 줄이면서도 낮은 오류율을 달성하기 때문이다<sup>[6]</sup>.

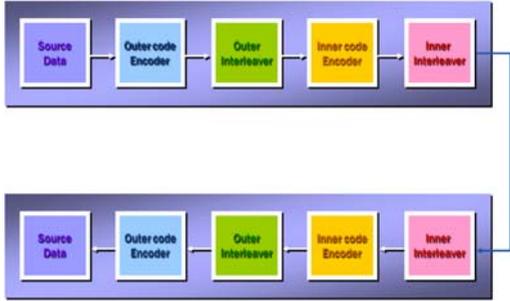


Fig. 6 Block diagram of concatenated coding system

본 논문에서는 무선통신시스템에서 주로 사용하고 있는 연결부호 방식으로서, 외부 부호는 RS부호를 사용하고, 내부 부호는 컨벌루션 부호를 사용해 수중채널에서의 성능을 확인하고자 한다.

### 4. 시뮬레이션

#### 4.1 시뮬레이션 환경

수중통신 채널에서 부호화기의 성능을 확인하기 위한시뮬레이션 환경은 Fig. 7과 같다. 이때 수중

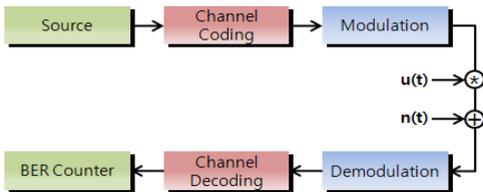


Fig. 7 Simulation block diagram

Table 2 Simulation parameter

Modulation	BPSK, 8PSK(PTCM)	
fs[Hz]	50k	
fc[Hz]	20k	
전송률[bps]	100~600	
Channel u(t)	distance : 1km multi-path : 3path	
오류정정 부호	컨벌루션	k(구속장)=7, R=1/2, G(x)=(133,171) <sub>s</sub>
	RS(N,K,t)	N=255, t=8,16,32, K=N-2*t
	터보부호	4state, Iteration=5
	PTCM	Convolution+8PSK
	연접부호	RS+INT+Convolution

통신 채널 모델과 채널 부호에 사용된 파라미터는 Tabel 2에 나타내었다.

fc가 20kHz이고, fs가 50kHz이므로 각 bit당 할당되는 샘플수는 식 (1)과 같이 계산할 수 있다.

$$N_s = f_s / D_R \quad (D_R = \text{data rate}) \quad (1)$$

#### 4.2 시뮬레이션 결과

모델링된 수중채널과 함께 AWGN을 적용하여 수중 무선통신 환경에서 Uncoded BPSK, (2,1,7) 컨벌루션 부호, Turbo 부호, PTCM(Pragmatic Trellis Coded Modulation)의 성능은 Fig. 8부터 Fig. 11까지 나타내었다.

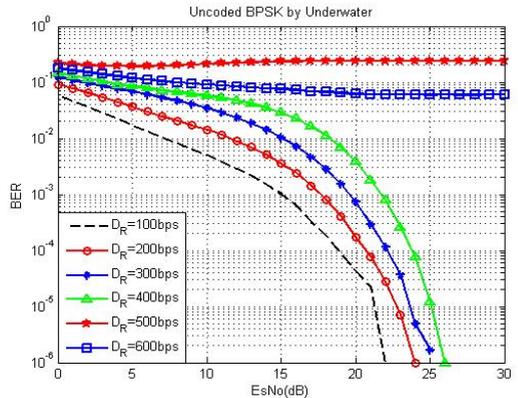


Fig. 8 Uncoded BPSK performance by underwater channel

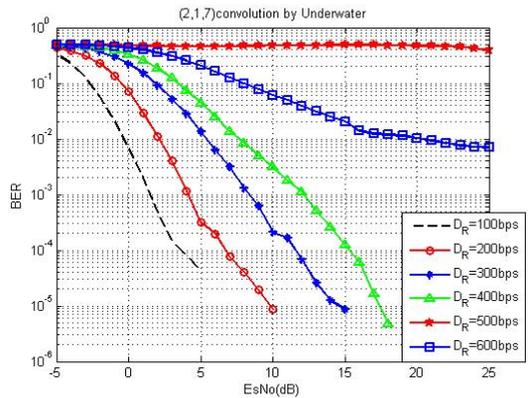


Fig. 9 Convolution code performance by underwater channel

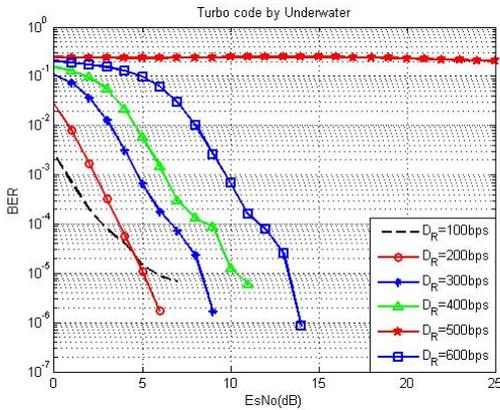


Fig. 10 4state turbo code performance by underwater channel

Fig. 8부터 Fig. 10까지 살펴보면, 전송률이 높아질수록 수중통신채널에서 비트오류율 성능이 열악해지다가 전송률이 500bps 이상이 되면서 다중경로에 의한 잡음의 영향으로 오류마루 현상이 발생하는 것을 확인할 수 있다.

그리고 보다 강력한 오류정정부호를 사용할수록, 수중 통신 채널에서 비트오류율 성능이 개선되는 것을 확인할 수 있는데, 특히 터보부호를 오류정정부호로 사용할 경우 전송률이 500bps 일 때의 다중경로에 의한 오류마루 현상을 극복해내지 못하지만, 전송률이 600bps 일 때의 다중경로에 의한 오류는 극복해내는 것을 확인할 수 있다.

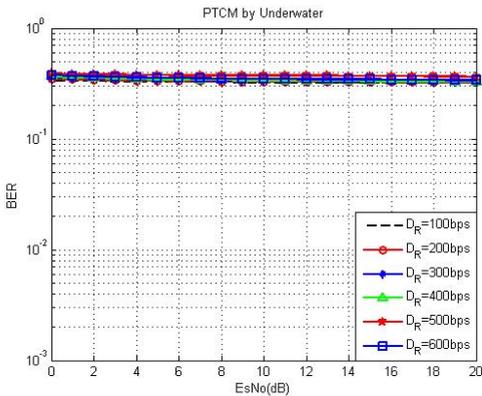


Fig. 11 PTM performance by underwater channel

Fig. 11은 (2.1.7) 컨벌루션 부호를 사용한 PTM의 성능을 나타내고 있다. PTM의 경우

8PSK변조를 사용하면서 다중경로의 영향이 BPSK보다 급증하게 되면서 오류를 정정하지 못하는 것을 알 수 있다.

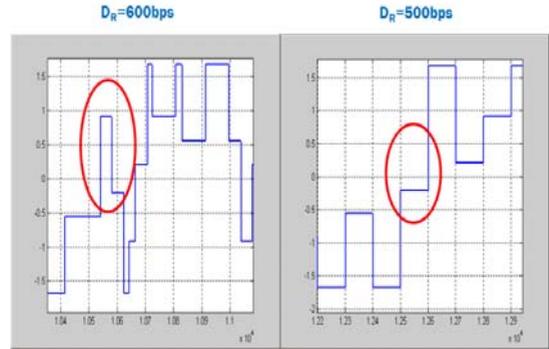
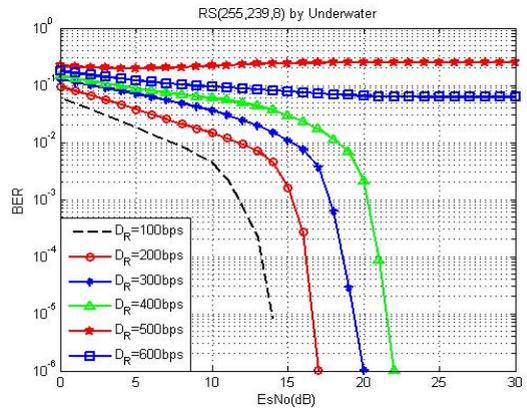
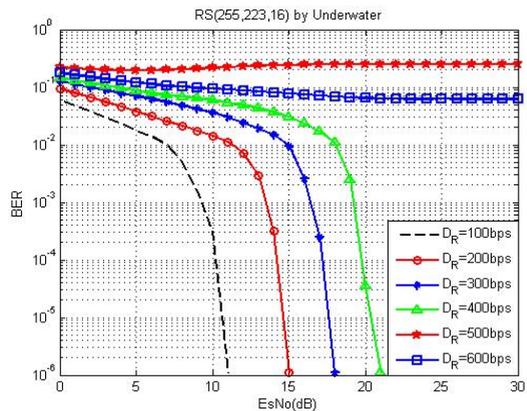


Fig. 12 Distortion of receive signal by multipath



(a) t = 8



(b) t = 16

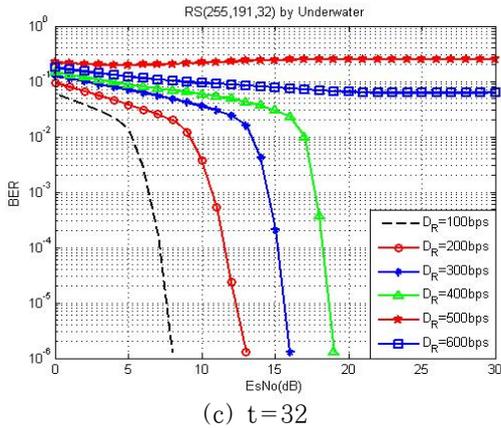


Fig. 13 RS code performance by underwater channel

특이한 점은 전송률이 600bps일 때보다 전송률이 500bps일 때 더 많은 오류가 발생하는 것을 볼 수 있는데, 이는 본 시뮬레이션 상에서 복조단에서 수신신호를 검출할 때 일정한 지점에서 하는 것이 아니라, 한 신호의 모든 구간을 한번 탐색하여 최적점을 찾아내는 방법을 사용하였다. 따라서 전송률이 500bps일 때는 한 개의 비트 전체 구간이 같은 다중경로의 영향을 받는 반면, 전송률이 600bps일 때는 한 개의 비트 내에서도 다른 다중경로의 영향을 받는 부분이 생기면서 신호의 왜곡이 덜한 부분이 생기기 때문에 오류가 줄어드는 것을 알 수 있다. Fig. 12에서는 AWGN이 없는 환경에서 전송률이 500bps와 600bps일 때의 수신신호의 일부로써, 이러한 현상이 나타나는 것을 설명하고 있다.

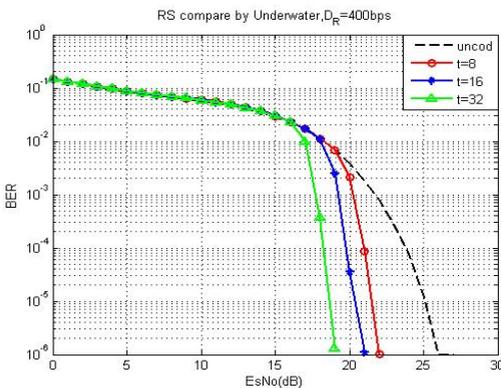
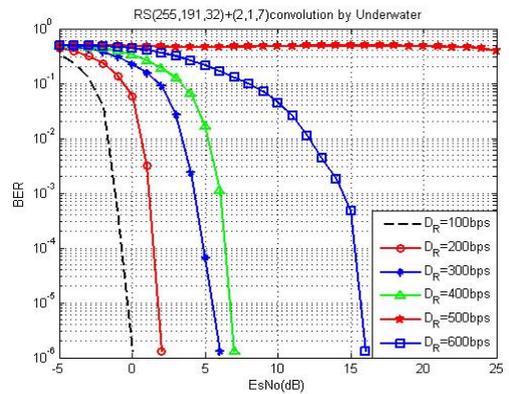


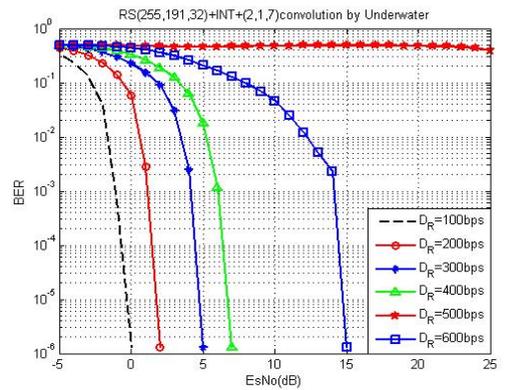
Fig. 14 Comparison with RS code performances

Fig. 13에서는 수중채널에서 전송률과 RS부호의 정정 능력에 따른 성능을 나타내었다.

Fig. 14에서는 전송률이 400bps일 때, 오류정정 능력이 각각 다른 RS부호의 성능을 비교하여 나타내었다. 그래프의 오류정정 시점을 살펴볼 때, 오류정정 능력이 32심볼인 RS부호를 사용하면, uncoded QPSK의 비트오류율 성능이  $10^{-2} \sim 10^{-3}$ 을 확보할 때, RS부호를 통해 모든 오류를 정정할 수 있음을 알 수 있다.



(a) Without interleaver



(b) With interleaver

Fig. 15 Concatenated code performance by underwater channel

Fig. 15는 무선통신 규격에서 주로 사용되고 있는 RS부호와 컨벌루션 부호의 연접부호의 성능을 나타낸 것이다. Fig. 15의 (a)와 (b)를 비교하여 보았을 때 성능의 차이가 거의 없으므로 보아, 수중채널에서 인터리버의 효과는 거의 없음을 알 수

있다. 이는 수중 채널의 다중경로는 연접오류라기 보다는 랜덤오류와 가깝기 때문에 인터리버의 효과를 거의 볼 수 없는 것이다.

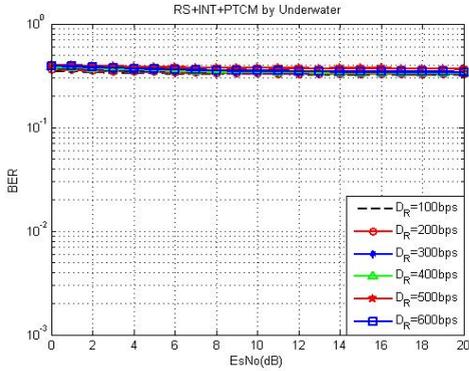


Fig. 16 RS+PTCM performance by underwater channel

Fig. 16은 수중채널에서 RS부호와 PTCM을 연접해서 사용했을 경우 그 성능을 나타낸 것이다. Fig. 11과 마찬가지로 PTCM을 사용할 경우 다중 경로에 의한 영향이 증가하면서 오류정정능력이 벗어나 오류를 정정하지 못함을 알 수 있다.

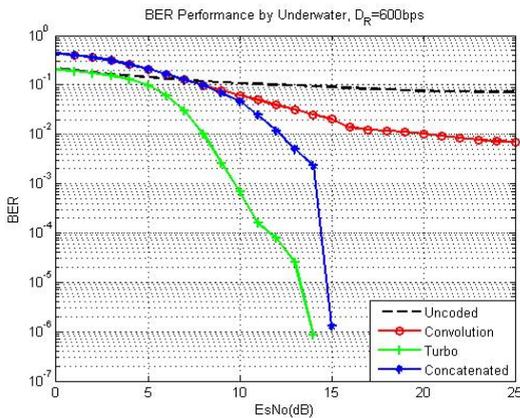


Fig. 17 Comparison of various channel code performance by underwater channel

Fig. 17은 수중채널의 다중경로가 존재하는 전송률이 600bps에서, Table 2를 바탕으로 시뮬레이션 된 오류정정 부호들의 성능을 비교하여 나타내었다. 단일 오류정정 부호로서는 터보부호를 사

용할 경우 수중채널에서 다중경로로 인한 오류를 정정할 수 있지만, RS부호나 컨벌루션 부호로는 오류를 정정하지 못하고 오류마루 현상이 생기는 것을 알 수 있으며, RS부호와 컨벌루션 부호를 연접해서 사용할 때 다중경로에 의한 오류를 극복할 수 있다.

### 5. 결론

본 논문에서는 모델링된 수중통신채널 환경에서 컨벌루션 부호를 비롯하여 최근 뛰어난 오류정정 능력으로 주목받고 있는 반복부호중의 하나인 터보부호, 무선 통신에서 적용되고 있는 연접부호 및 인터리버등을 시뮬레이션하여, 수중에서의 다중경로 극복을 위한 효과적인 오류정정부호에 대한 연구를 하였다.

수중 채널의 다중경로에 의한 영향은 전송률에 따라서 증가하며, 이를 극복하기 위해서는 단일 부호로서는 터보부호를 사용하거나 RS부호등을 연접하여 사용할 때 다중경로를 극복하고 성공적인 통신을 할 수 있음을 알 수 있다. 특히 RS(255,191,32) 부호는 비트오류율을  $10^{-2} \sim 10^{-3}$ 을 확보하게 되면 거의 모든 오류를 정정할 수 있으므로, 다른 부호와 RS부호를 연접하여 사용할 경우 오류 정정 능력을 높일 수 있다.

그리고 수중채널의 다중경로에 의한 영향은 연접오류의 특성보다는 랜덤오류의 특성이 강하기 때문에 인터리버의 효과를 거의 볼 수 없지만, 연접부호를 사용할 경우 AWGN에서 발생할 수 있는 연접오류에 대한 대비를 위해 사용해야 할 것이다. 본 논문에서 제시된 오류정정부호 알고리즘은 현재 지상 무선 통신에서 주로 적용되고 있는 방식이며, 기존의 컨벌루션 부호 및 RS 부호와의 성능 비교를 통해 차세대 수중통신 적용 부호화 알고리즘 적용 가능성을 검토하였다. 현재 수중통신에서는 MIMO(Multi Input Multi Output)채널에서 시공간 부호화 방식의 적용이 연구되어지고 있으며, 향후 시공간 방식의 성능과 비교 검토차원에서 활용성이 높다고 할 수 있다. 그리고 단순한 3-path 채널 모델이 아니라 더욱더 복잡한 한국해

양에 적합한 수중채널을 모델링 하여 적용하여야 할 것이다.

### 감사의 글

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었으며, 이에 대해 깊이 감사를 드립니다. (계약번호UD070054AD)

“본 연구는 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음” (IITA-2009-C1090-0902-0010)

### 참고문헌

- [1] M. Stojanovic, J. Catipovic, and J. Proakis, “Phase coherent digital communications for underwater acoustic channels.”, IEEE J. Ocean. Eng., Vol. 19, No. 1, pp. 100-111, Jan 1994.
- [2] M. Stojanovic, J. Catipovic, and J. Proakis, “Adaptive multi-channel combining and equalization for underwater acoustic communications.”, J. Acoust. Soc. Amer., Vol. 94, pp. 1621-1631, 1993.
- [3] M. Stojanovic, “Recent advances in high-speed underewater acoustic communications”, IEEE J. Ocean. Eng., Vol. 21, No. 2, pp. 125-136, Apr. 1996.
- [4] 정진우, 김락훈, 심태보, 김성일, “수중통신 채널에서 적응변조기법을 적용한 STBC 시스템의 성능분석”, 수중음향학 학술발표회 논문집, 22회, 2007.8
- [5] C.Berrou, A.Glavieux, and P.Thitimajshima, “Near shanon limit error-correcting coding and decoding : Turbo-Codes”, in Proc. ICC93, 1993.
- [6] G. D. Forney, Jr., “Concatenated Codes”, Cambridge, MA: MIT. Press, 1996.

## 저 자 소 개



### 김남수(金男洙)

2008년 2월: 한국해양대학교 전파공학과 (공학사), 2008년 3월~현재: 한국해양대학교 전파공학과 석사과정

<주 관심분야> 위성통신, 이동통신, 변·복조기술, 채널코딩, FPGA 기술 등



### 김민혁(金慇赫)

2006년 2월: 한국해양대학교 전파공학과 (공학사), 2008년 2월: 한국해양대학교 전파공학과(공학석사)

2008년 3월~현재: 한국해양대학교 전파공학과 박사과정

<주 관심분야> 위성통신, 이동통신, 변·복조기술, 채널코딩, FPGA 기술 등



### 박태두(朴泰斗)

2008년 2월 : 한국해양대학교 전파공학과 졸업(공학사), 2008년 3월~현재 한국해양대학교 전파공학과 석사과정

<주 관심분야> 위성통신, 이동통신, 변·복조기술, 채널코딩, FPGA 기술 등



### 김철승(金哲丞)

2009년 2월: 한국해양대학교 전파공학과 (공학사), 2009년 3월~현재: 한국해양대학교 전파공학과 석사과정

<주 관심분야> 위성통신, 이동통신, 변·복조기술, 채널코딩, FPGA 기술 등



### 정지원(鄭智元)

1989년 2월 :성균관대학교 전자공학과 (공학사), 1991년 2월 :성균관대학교 전자공학과(공학석사), 1995년 2월 :성균관대학교 정보공학과(공학박사), 1991년 1월~1992년 2월 : LG 정보통신연구소 연구원, 1995년 9월~1996년 8월 : 한국

통신 위성통신연구실 선임연구원, 1997년 3월~1998년12월 : 한국전자통신연구원 초빙 연구원, 1996년 9월~현재: 한국해양대학교 전파공학과 정교수, 2001년 8월~2002년 8월 : 캐나다 NSERC Fellowship (Communication Research Center 근무)

<주관심분야> 위성통신, 이동통신, 변.복조기술, 채널코딩, FPGA 기술 등