

<http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2021.7.3.565>

JCCT 2021-8-67

## 디지털 통신 시스템의 채널 복호 방식

### Channel Decoding Scheme in Digital Communication Systems

심용걸\*†

Yong-Geol Shim\*†

**요약** 디지털 통신 시스템의 수신기에서 발생하는 오류를 정정하기 위한 채널 부호의 연판정 복호 방식을 제안하였다. 선형 블록 부호의 선형적이고 산술적인 구조를 활용하여, 효율적으로 복호를 수행할 수 있는 방법을 제시하였다. 이 방법으로 복호 오류 확률을 감소시킬 수 있었다. 또한, 복호의 복잡도 역시 함께 감소시키는 것이 가능하게 되었다. 최적의 복호를 달성하기 위한 충분조건을 도출하였다. 이로 인하여 후보 부호어를 효율적으로 탐색할 수 있었다. 제안된 복호 방식으로 효과적으로 복호를 수행하면서도 블록 오류 확률을 낮출 수 있었다.

**주요어** : 채널 복호, 오류 정정, 디지털 통신 시스템

**Abstract** A soft-decision decoding scheme of a channel code for correcting an error occurring in a receiver of a digital communication systems is proposed. A method for efficiently decoding by use of the linear and arithmetic structure of linear block codes is presented. In this way, the probability of decoding errors has been reduced. In addition, it is possible to reduce the complexity of decoding as well. Sufficient conditions for achieving optimal decoding has been derived. As a result, the sufficient conditions enable efficient search for candidate codewords. With the proposed decoding scheme, we can effectively perform the decoding while lowering the block error probability.

**Key words** : Channel decoding, Error correction, Digital communication systems

#### 1. 서론

디지털 통신 시스템은 다양한 디지털 회로들로 이루어져 있다[1, 2]. 송신기와 수신기는 디지털 데이터를 보내고 받는다. 그런데 통신 채널에 존재하는 잡음이 디지털 데이터에 영향을 주게 되며[3], 이 잡음으로 인하여 수신기에서 오류가 발생한다. 이 오류를 검출하거나, 정정하기 위하여 수신기는 오류 정정 부호를 사용

해서 오류를 제어한다. 본 논문에서는 디지털 통신 시스템의 수신기에서 발생하는 오류를 정정하기 위한 채널 부호의 연판정 복호 방식을 제안한다.

오류 정정 부호의 연판정 복호법[4]은 많은 관심을 받으며, 활발하게 연구되고 있다. 연판정 복호법은 채널 측정 정보를 이용하여 더욱 정교하게 복호를 수행하는 방법이다. 채널 측정 정보는 통신 채널을 거쳐서 수신된 신호의 측정값으로부터 얻어지며, 수신된 신호의 신뢰성에

\*정회원, 단국대학교 전자전기공학부 교수 (†제1저자)  
접수일: 2021년 7월 27일, 수정완료일: 2021년 8월 1일  
게재확정일: 2021년 8월 6일

Received: July 27, 2021 / Revised: August 1, 2021

Accepted: August 6, 2021

\*Corresponding Author: ygshim@dankook.ac.kr

Dept. of Electronics and Electrical Eng., Dankook Univ, Korea

대한 정보를 나타낸다[5].

경관정 복호법은 단순히 0 또는 1의 디지털 데이터만을 이용하여 복호하는 방법이다. 반면에 연관정 복호법은 디지털 데이터와 채널 측정 정보를 함께 사용하여 정밀하게 복호하는 방법이다. 연관정 복호법을 사용하면 복호 성능을 크게 개선할 수 있다.

오류 정정 부호 중에서 선형 블록 부호는 선형적이고 산술적인 구조[6]를 가지고 있어서, 효율적으로 부호와 복호를 수행할 수 있다. 특히, 복호 과정에서 선형 블록 부호의 산술적 구조를 적극적으로 활용할 수 있는 복호법이 발견되면, 복호의 복잡도를 크게 감소시킬 수 있다. 따라서 연관정 복호 과정에서 블록 부호의 산술 구조를 효과적으로 활용할 수 있는 복호법의 연구가 널리 진행되고 있다.

연관정 복호법을 크게 분류하면 두 종류의 방법이 있다. 그중 하나는 블록 오류 확률을 최소화하기 위해 수신된 시퀀스와의 거리를 최소화하는 부호어를 선택 [5-7]하는 것이다. 다른 하나는 심볼 오류 확률을 최소화하기 위해 부호어의 각 심볼을 복호[8]하는 것이다. 그런데 심볼 오류 확률을 최소화하는 복호법을 사용하다 보면, 복호 결과 시퀀스가 부호어로 성립되지 않는 경우가 발생하는 단점이 있다. 이러한 이유로 후자의 방법은 제한적인 용도로만 사용되고 있다. 본 논문에서는 전자의 방법인, 수신된 시퀀스와의 거리를 최소화하여 블록 오류 확률을 최소화하는 복호법을 연구한다.

현재까지 연구된 복호법들은 블록 오류 확률 또는 복호 복잡도 중 한 가지에 장점이 있다. Zang 등[9]은 저밀도 패리티 검사 부호를 결합하여 피드백 방법을 사용한 전신 채널 구축 방법을 제안하였다. Babalola 등 [6]이 제안한 순환 부호 알고리즘은 확장된 패리티 검사 방정식을 기반으로 하는데, 수신 벡터에서 얻은 연관정 신뢰도 정보 행렬을 이용하여 체계적으로 패리티 검사 행렬을 변환하는 동작을 수행한다. Wijekoon 등 [10]은 Reed-Solomon 부호의 연관정 복호를 위한 반복적 방법을 제안하였다. 이 복호법에는 대체 패리티 검사 매트릭스를 이용하여 심볼 단계에서 신뢰성 전파 개념을 적용되어 있다. Choi 등[11]은 순서화된 통계 기반 복호법을 제안하였다. Lin 등[4]은 소수 길이의 순회 부호를 반복적으로 연관정 복호하는 방법을 제시하였다. Babalola 등은 이진 순환 코드에 대한 일반화 된 패리티 검사 변환 알고리즘[12]을 발표하였다.

그런데 현재까지 연구되어 있는 기존의 복호법들은 블록 오류 확률은 개선하면 복호의 복잡도가 증가하고, 복호의 복잡도를 낮추면 블록 오류 확률이 증가하는 문제점이 있다. 본 논문의 연구 목적은 이 딜레마를 해결하는 것이다. 블록 부호의 산술적 구조를 적극적으로 활용하여 오류 확률과 복호의 복잡도를 모두 개선하는 것을 목표로 한다.

본 논문에서는 후보 부호어를 효율적으로 탐색하는 방법을 찾기 위하여, 최적의 복호를 달성하기 위한 충분조건을 도출한다. 이 충분조건을 바탕으로 효과적으로 복호를 수행하면서도 블록 오류 확률을 낮출 수 있는 복호법을 제안한다. 최초의 경관정 복호에 의한 오류 패턴의 위치와 신뢰도가 낮은 비트의 위치를 주의 깊게 비교하여 후보 부호어들을 효율적으로 탐색하고, 올바른 부호어를 찾아낼 수 있는 복호법을 연구한다.

제안된 복호법은 효과적으로 복호를 수행하기 위하여 두 가지 목표를 추구한다. 첫 번째 목표는 탐색이 이루어지는 후보 부호어 집합에 전송된 부호어가 포함되도록 하는 것이다. 두 번째 목표는 후보 부호어 수를 줄여서 복호의 복잡도를 감소시키는 것이다. 그렇게 하면 경관정 복호 과정의 횟수를 최소한으로 감소시키면서 블록 오류 확률도 동시에 감소시킬 수 있다.

## II. 디지털 통신 시스템 모델링

디지털 통신 시스템의 송신기에서 채널 부호화된 부호어를  $W=(w_1, w_2, \dots, w_n)$ 으로 표시한다. 채널 부호의 부호 길이가  $n$ 이고, 한 블록 내에서 정보 비트 수는  $k$ 이다. 채널 부호는 오류 정정을 위하여 선형 블록 부호를 사용한다. 이 선형 블록 부호의 부호율은  $R=k/n$ 이다. 이 부호의 최소 해밍 거리를  $d$ 로 표시한다.

송신기는 이 부호  $W$ 를 PSK 변조하여 2진 반극성 신호  $A=(a_1, a_2, \dots, a_n)$ 를 전송한다. 전송 신호의 에너지를  $E_s$ 로 표시하면,  $a_i = \sqrt{E_s}(1-2w_i)$ 가 된다. 이 때, 정부 비트당 에너지  $E_b = E_s/R$ 이다.

수신기는 전송 신호에 채널 잡음이 부가된 수신 신호를 받는다. 채널 잡음은  $Z=(z_1, z_2, \dots, z_n)$ 이며, 여기서  $z_i$ 는 평균이 0이고 분산이  $N_0/2$ 인 확률 변수이다.  $N_0$ 는 잡음전력밀도이다. 수신 벡터는  $B=(b_1, b_2, \dots, b_n)$ 로 표시되며, 여기서  $b_i = a_i + z_i$ 이다. 이 논문에서 덧셈 연산자  $+$ 는 피연산자들의 속성에 따라 2진 덧셈 또는 실수

덧셈을 표시한다.

복조기는 수신 벡터  $B$ 에서 두 개의 벡터  $H$ 와  $R$ 을 출력한다.  $H=(h_1, h_2, \dots, h_n)$ 은 경관정 벡터이고,  $R=(r_1, r_2, \dots, r_n)$ 은 연관정 벡터이다.  $h_i$ 이 경관정 기준치보다 크면  $h_i=0$ 으로 판정하고, 경관정 기준치보다 작으면  $h_i=1$ 로 판정한다. 연관정 벡터 성분  $r_i$ 는 수신 신호 성분  $b_i$ 의 절댓값이다. 그림 1에 디지털 통신 시스템의 구성도를 나타내었다.



그림 1. 디지털 통신 시스템의 구성도  
 Figure 1. Block diagram of a digital communication system

### III. 채널 복호 방식

#### 1. 후보 부호어 설정

채널 복호기는 경관정 벡터  $H$ 와 연관정 벡터  $R$ 을 이용하여 부호어  $W$ 를 찾는다. 부호어를 추정하기 위하여 후보 부호어들의 집합을 설정하고, 이 후보 부호어들 중에서 최적의 부호어를 선정한다. 후보 부호어에는 연관정 가중치가 부여되는데, 이 연관정 가중치가 최소인 후보 부호어를 최종 복호 결과로 출력한다.

경관정 벡터  $H$ 와 부호어  $W$ 의 차이인 오류 패턴  $P=(p_1, p_2, \dots, p_n)$ 는 경관정 벡터와 부호어의 2진 덧셈으로 계산된다. 오류 패턴  $P$ 의 연관정 가중치  $Q(P)=\sum_{i=1}^n r_i p_i$ 가 최소인 후보 부호어를 찾으면 최적의 복호가 달성된다.

경관정 벡터  $H$ 의 비트들 중 연관정 신뢰도가 낮은 위치들을 반전시키는 조합으로 수정 벡터 집합  $D$ 를 구성한다. 집합  $D$ 에 소속된 수정 벡터들을 경관정 복호하여 후보 부호어들의 집합  $G$ 를 얻는다.

집합  $G$ 에 소속된 후보 부호어에 대응하는 오류 패턴의 연관정 가중치를 계산하여 최적의 후보 부호어를 선정한다.

#### 2. 오류 패턴에 기반한 탐색 벡터

오류 패턴과 가장 유사한 부호어를 찾아내어 이 부호어를 수정의 기준으로 삼아 복호를 수행한다. 물론, 오류 패턴과 일치하는 부호어가 있다면, 이 부호어를

수정의 기준으로 삼을 때 연관정 가중치를 최소로 할 수 있다. 하지만, 영이 아닌 부호어의 해밍 가중치는 최소 해밍 거리보다 크고, 오류 패턴이 1인 위치의 수는 최소 해밍 거리의 절반 이하이다. 그러므로 오류 패턴과 일치하는 부호어를 항상 찾을 수는 없다. 따라서 부호어를 찾기에 앞서서 탐색 벡터  $X_m=(x_{m1}, x_{m2}, \dots, x_{mn})$ 을 구성한다. 벡터  $X_m$ 의 구성은 다음과 같다.

오류 패턴이 1인 위치의 수를  $\xi(P)$ 로 표시하자. 오류 패턴이 1인 위치에서는  $X_m$ 의 원소를 1로 한다. 오류 패턴이 0인 위치에서는 연관정 가중치가 가장 작은  $m-\xi(P)$ 개의 위치의  $X_m$  원소를 1로 한다. 나머지  $X_m$ 의 원소들은 모두 0으로 한다.

연관정 벡터  $R=(r_1, r_2, \dots, r_n)$ 의 원소  $r_i$ 들을 다음과 같이 세 가지로 분류한다.

$$\begin{aligned} A_1 &= \{r_i \mid p_i=1 \text{ 이고 } x_{mi}=1\} \\ A_2 &= \{r_i \mid p_i=0 \text{ 이고 } x_{mi}=1\} \\ A_3 &= \{r_i \mid p_i=0 \text{ 이고 } x_{mi}=0\} \end{aligned}$$

탐색 벡터  $X_m$ 은 오류 패턴이 0인 위치에서 연관정 가중치가 가장 작은  $m-\xi(P)$ 개의 위치에 1을 갖기 때문에  $A_2$ 의 모든 원소는  $A_3$ 의 모든 원소보다 클 수 없다.

연관정 가중치  $Q(E_1 + U_d^*)$ 는  $Q(E_1 + Y_m)$ 보다 작거나 같다.  $Y_m$ 의 해밍 무게를  $j$ 라 하자.  $Y_m$ 은 부호어이므로  $j \geq d$ 이다.  $U_d^*$ 와  $Y_m$ 의 원소가 공통으로 1이 되는 곳은  $e_{1i}=1$ 인  $W_H(E_1)$ 개의 위치와  $e_{1i}=0$ 이면서 신뢰도가 가장 작은  $[d - W_H(E_1)]$ 개의 위치이다.  $Y_m$ 은 이외에도  $e_{1i}=0$ 이면서 신뢰도가 다음으로 작은  $(j-d)$ 개의 위치에 1을 갖는다. 따라서  $Q(E_1 + U_d^*) - Q(E_1 + Y_m)$ 는  $(j-d)$ 개의 신뢰도 값들의 합이 되며, 이것은 음이 아니다. 그러므로  $Q(E_1 + U_d^*) \leq Q(E_1 + Y_m)$ 이다.

탐색 벡터  $X_m$ 을 경관정 복호하여 얻어진 부호어를  $Y_m$ 이라 하자. 부호어  $Y_m$ 의 해밍 무게는 최소 해밍 거리보다 크거나 같다. 또한,  $(P+X_m)$ 의 연관정 가중치는  $(P+Y_m)$ 의 연관정 가중치보다 작거나 같다. 따라서 오류 패턴  $P$ 의 연관정 가중치가  $(P+Y_m)$ 의 연관정 가중치보다 작거나 같으면  $P$ 에 대응하는 후보 부호어는 최적 복호 결과이다.

3. 최적 복호 달성 판정

복호의 복잡도를 감소시키기 위하여 다음 두 가지의 충분조건 중 하나가 만족되면 복호를 종료한다. 충분조건 1의 만족으로 최적 복호가 달성된 것이 판정되었으므로 더 이상의 후보 부호어 탐색을 중단하고 복호를 종료한다.

1) 충분조건 1

오류 패턴  $P$ 가 영벡터이면, 연관정 가중치가 최소이다. 따라서 이 오류 패턴에 해당하는 후보 부호어가 최적 복호 결과이다.

2) 충분조건 2

오류 패턴  $P$ 의 연관정 가중치가  $(P+Y_m)$ 의 연관정 가중치보다 작거나 같으면, 이 연관정 가중치가 최소이다. 따라서 이 오류 패턴에 해당하는 후보 부호어가 최적 복호 결과이다.

4. 복호 알고리즘

1)  $H$ 의 경관정 복호를 수행한다. 경관정 복호 결과인 후보 부호어  $W_1$ 과 오류 패턴  $P_1$ 이 출력된다.

2) 후보 부호어  $W_1$ 과 오류 패턴  $P_1$ 이 [충분조건 1] 또는 [충분조건 2]을 만족하면  $W_1$ 을 최종 복호 결과로 결정하고 복호를 종료한다. 그렇지 않으면 3)단계로 간다.

3) 탐색 범위의 모든 인덱스 변수  $m$ 에 대하여 i)단계부터 iv)단계까지의 과정을 수행한다.

- i) 탐색 벡터  $X_m$ 을 구성한다.
- ii)  $X_m$ 의 경관정 복호를 수행한다. 경관정 복호 결과인 부호어  $Y_m$ 이 출력된다.
- iii) 후보 부호어  $W_m = W_1 + Y_m$ 과 오류 패턴  $P_m = P_1 + Y_m$ 을 계산한다.
- iv) 후보 부호어  $W_m$ 과 오류 패턴  $P_m$ 이 [충분조건 1] 또는 [충분조건 2]을 만족하면  $W_1$ 을 최종 복호 결과로 결정하고 복호를 종료한다. 그렇지 않으면 인덱스 변수  $m$ 을 다음 값으로 세팅하고 I) 단계로 간다.

4) 탐색된 후보 부호어들 중에서 연관정 가중치가 가장 작은 것을 최종 복호 결과로 결정하고 복호를 종료한다.

IV. 성능 평가 및 검토

제안하는 알고리즘의 성능을 평가하기 위하여 II장에서 모델링한 디지털 통신 시스템을 컴퓨터 시뮬레이션으로 구현하였다. 이 모델에 제안 알고리즘을 적용하여 오류 확률과 복호의 복잡도를 평가했다. 제안 알고리즘의 비교 대상으로 최근에 발표된 Babalola 등[12]의 일반화된 패리티 검사 변환(Generalized Parity Check Transformation, GPCT) 알고리즘도 함께 수행하였다.

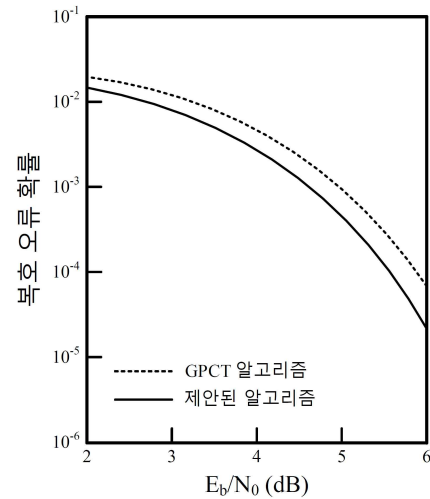


그림 2. 복호 오류 확률  
Figure 2. Decoding error probability.

채널 부호는 부호 길이가 23이고 정보 길이가 12인 골레이(Golay) 부호를 선정하였다. 골레이 부호는 완전 부호이면서 선형성과 순회성을 모두 가지고 있다. 이 선형성과 순회성을 이용하여 효율적으로 부호화와 복호화를 구현할 수 있다. 또한 완전 부호의 특징인 높은 오류 제어 능력도 함께 보유하고 있다. 그래서 골레이 부호는 디지털 통신 시스템에 자주 사용되고 있다.

그림 2는 여러 가지 신호대 잡음비에 대한 복호 오류 확률이다. 신호 대 잡음비는  $E_b/N_0$ 의 형식으로 표시하였다.  $E_b$ 는 정보 비트당 에너지이고,  $N_0$ 는 잡음전력 밀도이다. 제안된 알고리즘은 GPCT 알고리즘에 비하여 낮은 복호 오류 확률을 달성하는 우수함을 보여준다.

제안된 알고리즘의 과정 중에는 연관정 정보의 적응적 순열화 과정에 포함되어 있다. 이로 인하여 후보 부호어들의 집합에 올바른 부호어가 포함될 가능성이 높아지는 것을 그림 2에서 확인할 수 있다.

그림 3은 여러 가지 신호대 잡음비에 대한 복호 복잡도이다. 제안된 알고리즘은 GPCT 알고리즘에 비하여 낮은 복호 복잡도로 구현되는 우수함을 보여준다.

복호 복잡도는 복호 수행에 소요되는 회로 구성의 규모와 소요 시간 등에 직접적인 관련이 있다. 복호 복잡도를 결정하는 요인은 여러 가지가 있다. 그런데 그 요인들 중에서 두드러지게 회로 구성이 방대하며 소요 시간이 많은 것은 경관정 복호 과정이다. 연관정 복호에는 여러 번의 경관정 복호 과정이 포함된다. 따라서 연관정 복호의 복잡도는 경관정 복호의 반복 횟수로 나타내는 것이 일반적이다.

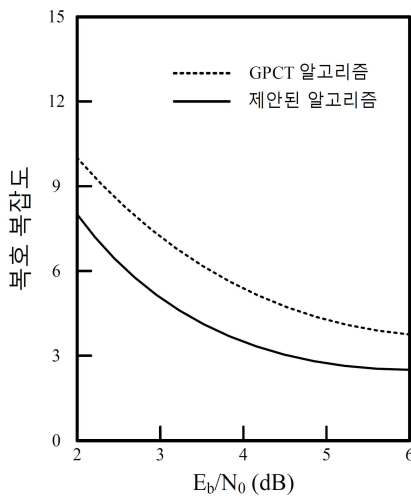


그림 3. 복호 복잡도  
 Figure 3. Decoding complexity

제안된 알고리즘은 최적 복호가 달성된 것을 조기에 판정하고 복호를 종료할 수 있다. III장 3절에서 도출한 충분조건은 복호의 복잡도를 감소시키는데 큰 비중을 차지한다. 최적 복호가 달성된 것을 조기에 판정할 수 있으므로, 더 이상의 후보 부호어 탐색을 중단하고 복호를 종료할 수 있다. 이 정교한 방법에 의하여 복호 복잡도가 감소되는 효과를 그림 3에서 확인할 수 있다.

## V. 결론

디지털 통신 시스템의 수신기에서 발생하는 오류를

정정하기 위한 채널 부호의 연관정 복호 방식을 제안하였다. 수신된 시퀀스와의 거리를 최소화하여 블록 오류 확률을 최소화하는 복호법을 제시하였다.

선형 블록 부호의 선형적이고 산술적인 구조를 활용하여, 효율적으로 복호를 수행할 수 있는 방법을 제시하였다. 이 방법으로 복호 오류 확률을 감소시킬 수 있었다. 또한, 복호의 복잡도 역시 함께 감소시키는 것이 가능하게 되었다.

최적의 복호를 달성하기 위한 충분조건을 도출하였다. 이로 인하여 후보 부호어를 효율적으로 탐색할 수 있었다. 제안된 복호 방식으로 효과적으로 복호를 수행하면서도 블록 오류 확률을 낮출 수 있었다.

제안된 복호법은 효과적으로 복호를 수행하기 위하여 두 가지 목표를 달성하였다. 첫 번째 목표는 탐색이 이루어지는 후보 부호어 집합에 전송된 부호어가 포함되도록 하는 것이다. 두 번째 목표는 후보 부호어 수를 줄여서 복호의 복잡도를 감소시키는 것이다. 이 두 가지 목표를 달성함으로써, 경관정 복호 과정의 횟수를 최소한으로 감소시키면서 블록 오류 확률도 동시에 감소시킬 수 있었다.

## References

- [1] H. Lee, J. Kang, J. Ahn, and J. Chung, "Performance Analysis of UWA Communication System by Diversity in UWA Channel," *The Journal of the Convergence on Culture Technology (JCCT)*, Vol. 3, No. 4, pp.191-198, November 30, 2017. <http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2017.3.4.191>
- [2] S. Park, and J. Heo, "A Study on the design and implementation of serial communication using only one pin," *The Journal of the Convergence on Culture Technology (JCCT)*, Vol. 1, No. 3, pp.83-85, August 31, 2015. <http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2015.1.3.83>
- [3] K. T. Lee, and J. G. Ki, "Objective Material analysis to the device with IoT Framework System," *The International Journal of Advanced Culture Technology (IJACT)*, Vol. 8, No. 2, pp. 289-296, June 2020. <https://doi.org/10.17703/IJACT.2020.8.2.289>
- [4] S. Lin, K. Abdel-Ghaffar, J. Li, and K. Liu, "A Scheme for Collective Encoding and Iterative Soft-Decision Decoding of Cyclic Codes of Prime Lengths: Applications to Reed-Solomon, BCH, and Quadratic Residue Codes," *IEEE*

- Transactions on Information Theory*, 2020. DOI: 10.1109/TIT.2020.2978383.
- [5] Y. G. Shim, "An Improvement of Soft Decision Decoding Algorithm Using Linear Block Codes," *International Journal of Software Engineering and Its Applications*, vol.7, no.6, pp. 319-324, 2013.
- [6] O. Babalola, and J. Versfeld, "Iterative Soft-Decision Decoding of Binary Cyclic Codes Based on Extended Parity-Check Transformation Algorithm," *2018 IEEE Canadian Conference on Electrical & Computer Engineering*, 2018. DOI : 10.1109/CC ECE.2018.8447536.
- [7] Y. G. Shim, "Forward Error Correction Codes in Communication Channels," *International Journal of Control and Automation*, vol. 10, pp. 131-144, 2016.
- [8] Y. G. Shim, "An Error Control Method with Linear Block Code in Sensor Networks," *International journal of distributed sensor networks*, vol. 2014 Article ID 439231, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2014/439231>.
- [9] G. Zhang, H. Wen, J. Pu and J. Tang, "Build-in wiretap channel I with feedback and LDPC codes by soft decision decoding", *IET Commun.*, vol. 11, no. 11, pp. 1808-1814, 2017.
- [10] V. B. Wijekoon, H. Dau, and E. Viterbo, "Iterative Decoding of Reed-Solomon Codes Based on Non-binary Matrices," *2019 IEEE International Symposium on Information Theory*, pp. 1082-1086, 2019.
- [11] C. Choi, and J. Jeong, "Fast and Scalable Soft Decision Decoding of Linear Block Codes," *IEEE Communications Letters*, vol. 23, no. 10, pp. 1753-1756, 2019.
- [12] O. Babalola, O. Ogundile, D. J. J. Versfeld, "A Generalized Parity-Check Transformation for Iterative Soft-Decision Decoding of Binary Cyclic Codes", *IEEE Communications Letters*, vol. 24, no. 2, pp. 316-320, 2020.

※ 이 연구는 2021학년도 단국대학교 대학연구비의 지원으로 연구되었음.
--