

논문 2015-52-12-4

# 시변 수중 음향 채널에서 코드 분할 다중 접속 방식의 폐루프 전력 제어 기법

(Closed-Loop Power Control for Code Division Multiple Access in  
Time-Varying Underwater Acoustic Channel)

서 보 민\*, 조 호 신\*\*

(Bo-Min Seo and Ho-Shin Cho<sup>©</sup>)

## 요 약

코드 분할 다중 접속 기법은 주파수 선택적 페이딩과 다중 경로 페이딩에 강인할 뿐만 아니라 주파수 재사용 효율이 좋으므로 수중 환경에서의 유망한 매체 접속 제어 기법으로 많은 연구가 진행되고 있다. 본 논문에서는 시변 수중 음향 채널에서 코드 분할 다중 접속 방식의 폐루프 전력 제어 기법을 설계한다. 본 기법에서는 싱크 노드가 센서 노드로부터 수신한 패킷의 수신 전력을 바탕으로 시변하는 상향 링크를 분석하고 각 센서 노드의 경로 손실의 크기를 포함한 제어 패킷을 센서 노드로 전송한다. 센서 노드는 이를 바탕으로 전력 제어를 수행함으로써 시변 수중 채널에서 효율적인 전력 제어가 가능하다.

## Abstract

Code division multiple access (CDMA) is one of the promising medium access control scheme for underwater acoustic sensor networks due to its beneficial features such as robustness against frequency-selective fading and high frequency-reuse efficiency. In this paper, we design a closed-loop power control scheme for the underwater CDMA, to adapt time-varying acoustic channel. In the proposed scheme, sink node sends to sensor nodes the associated path loss which is acquired by uplink-channel analysis based on received packets from the sensor nodes. Then, sensor nodes adjust their transmission power in an adaptive manner to time-varying underwater acoustic channel, according to the informations sent by the sink node.

**Keywords** : 코드 분할 다중 접속, 전력 제어, 수중 음향 센서 네트워크, 시변 수중 음향 채널

## I. 서 론

최근 해양 자원에 대한 중요성이 부각되면서 해양 환

경 감시, 자원 조사, 재난 방지, 해양 탐지 등과 같은 응용 분야에 대한 관심이 증가하고 있으며 이를 위한 수중 센서 네트워크 구성에 대한 중요성이 증가하고 있다<sup>[1]</sup>. 다양한 응용 분야에서 효율적인 수중 센서 네트워크를 구성하기 위해서는 센서 노드 사이의 신뢰성 있는 통신 링크의 구현이 필수적이며, 기존의 많은 연구에서 음향 신호를 사용하는 것이 수중 환경에서 가장 효율적으로 정보를 전달할 수 있는 방법임이 증명되었다<sup>[2]</sup>.

그러나 수중 음향채널은 느린 전파 속도, 제한된 대역폭, 다중 경로 페이딩(multipath fading), 주파수 선택적 페이딩(frequency-selective fading) 및 도플러 확산

\* 정회원, \*\* 평생회원, 경북대학교 대학원 전자공학부 (School of Electronics Engineering, Kyungpook National University)

© Corresponding Author(E-mail: hscho@ee.knu.ac.kr)

※ 이 논문은 2015년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(분산형 수중 관측·제어망 개발)

Received ; November 4, 2015 Revised ; November 18, 2015

Accepted ; November 25, 2015

(Doppler spread)으로 인한 높은 비트 오류율 등 통신 채널로서 열악한 특성을 보인다<sup>[3-4]</sup>. 또한 최근의 많은 연구에서 수중 음향 채널이 가지는 시변(time-varying) 특성이 물리 계층(physical layer) 뿐만 아니라 상위 계층의 프로토콜 설계에까지 반영되어야 함이 요구되고 있으며, 따라서 이러한 시변 특성을 시뮬레이터에 적용하여 성능을 분석하는 것이 현재의 추세이다<sup>[5-9]</sup>.

코드 분할 다중 접속(Code Division Multiple Access: CDMA) 기법은 주파수 선택적 페이딩과 다중 경로 페이딩에 강인할 뿐만 아니라 여러 노드가 연속적으로 전송하는 신호를 직교 부호를 사용하여 쉽게 구별할 수 있고 주파수 재사용 효율이 좋으므로 수중 환경에서의 유망한 매체 접속 제어 기법으로 활발히 연구되고 있다<sup>[10]</sup>. 그러나 CDMA 시스템을 효율적으로 운용하기 위해서는 원근 문제(near-far problem)<sup>[11-12]</sup>를 해결해야 하며, 이를 위해 각 센서 노드의 소모 전력을 최소화하고 CDMA 시스템의 용량(capacity)을 최대화할 수 있는 전력 제어 기법의 구현이 필수적이다. 기존의 수중 CDMA 시스템의 전력 제어 관련 연구는 대부분 하향 링크(down link)와 상향 링크(uplink)의 채널 환경이 동일하다고 가정하는 개방 루프 전력 제어(open loop power control)에 대한 것이며, 폐루프 전력 제어(closed-loop power control)에 대한 연구는 거의 이뤄지지 않았다<sup>[13-14]</sup>.

본 논문은 시변 수중 음향 채널 환경에서 시분할 복신(Time Division Duplexing: TDD) CDMA 시스템에서의 폐루프 전력 제어 기법을 제안한다. 제안 기법은 초기화 단계에서 싱크 노드가 CDMA 시스템 용량이 최대가 되는 수신 전력을 계산하고 이를 센서 노드에 알려준 뒤 반복되는 TDD 프레임(frame)에서 하향 링크-상향 링크 패킷 교환을 통해 채널 상태 변화에 대한 정보를 제공함으로써 센서 노드가 시변 채널에 맞추어 적응적으로 전송 전력을 조절할 수 있도록 한다. 또한 싱크 노드는 하향 링크의 패킷에 전송 시각을 포함하여 센서 노드가 싱크 노드와의 전파 지연 시간을 계산할 수 있도록 함으로써 모든 센서 노드의 상향 링크 패킷이 싱크 노드로 동시에 수신될 수 있도록 하여 시스템 용량을 최대화한다. 또한 본 논문에서는 시변 수중 음향 채널을 구현하여 성능 분석 모의실험에 반영한다. 시변 수중 음향 채널의 구현을 위해 3차원 토폴로지 환경에서 센서 노드의 움직임을 모델링하고, 이를 채널

구현 시뮬레이터의 입력 값으로 사용함으로써 시간에 따라 경로 손실(path loss)의 크기가 변하는 수중 음향 채널을 구현할 수 있다.

본 논문은 다음과 같은 구성을 가진다. 서론에 이어 II장에서는 제안하는 전력 제어 기법의 시스템 모델에 대해 설명하고, III장에서는 제안 기법의 절차 및 프레임 구조에 대해 서술한다. 이어 IV장에서는 모의실험을 통한 제안 기법의 성능 분석을 수행하며, 효율적인 성능 분석을 위해 시변 채널을 구현한다. 마지막으로 V장에서는 성능 분석 결과를 바탕으로 결론을 맺는다.

## II. 시스템 구조

### 1. 네트워크 구조

제안 기법은 싱크 노드와 센서 노드 사이의 패킷 교환을 통해 센서 노드의 송신 전력 제어가 수행되므로 싱크 노드와 센서 노드 사이의 양방향 통신 링크가 형성되어야 한다. 따라서 본 논문에서는 그림 1과 같이 하나의 싱크 노드를 중심으로 최대 통신 범위 이내에 다수의 센서 노드가 임의로 배치되어 있는 1-홉 네트워크 구조를 고려한다.

### 2. 시분할 복신 시스템

지상 환경의 CDMA 시스템에서는 단말(mobile station)에서 기지국(base station)으로의 통신 링크를 상향 링크, 기지국에서 단말로의 통신 링크를 하향 링크로 정의하며, 수중 음향 센서 네트워크에서는 싱크

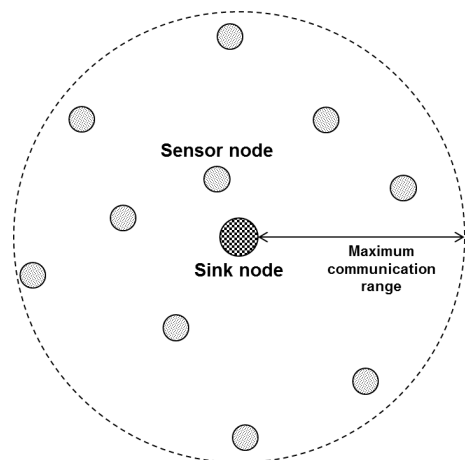


그림 1. 네트워크 구조  
Fig. 1. Network topology.

노드와 센서 노드가 각각 기지국과 단말의 역할을 담당한다고 본다. 상향 링크와 하향 링크의 운용은 서로 다른 주파수 대역을 상향 링크와 하향 링크에 할당하는 주파수 분할 복신(Frequency Division Duplexing: FDD) 기법과 시간 슬롯을 사용하여 상향 링크와 하향 링크를 번갈아가며 운용하는 TDD 기법으로 구분된다. 일반적으로 가용 주파수 대역이 제한적인 수중 환경에서 FDD 기법을 사용하는 것은 비현실적이다. 따라서 본 논문에서는 TDD 기법을 사용하는 TDD-CDMA 시스템을 고려하며, TDD 기법 운용을 위해 싱크 노드와 센서 노드 사이의 시간 동기화는 미리 수행되어 있다고 가정한다.

### III. 전력제어 기법

그림 2는 제안 기법에서의 채널 구조를 나타낸다. 제안 기법의 채널은 싱크 노드가 주변 센서 노드의 수를

파악하고 CDMA 시스템의 용량을 최대화하는 수신 전력의 크기를 계산하며 센서 노드에게 직교 코드(orthogonal code)를 할당하는 초기화 단계(initialization phase)와 그 후 TDD 프레임이 연속적으로 반복되는 구조를 가진다. 하나의 TDD 프레임에서는 한 번의 하향 링크-상향 링크 패킷 송수신이 수행된다. 하향 링크에서는 싱크 노드가 센서 노드에게 전력 제어 정보를 전송하며, 상향 링크에서는 센서 노드가 싱크 노드에게 데이터를 전송한다. TDD 프레임에서의 패킷 교환을 통해 센서 노드는 시변 수중 채널의 특성을 반영하여 자신의 전송 전력을 조절할 수 있다.

#### 1. 초기화 단계

그림 3은 초기화 단계에서 싱크 노드와 센서 노드 사이의 시그널링 프로토콜을 나타낸다. 초기화 단계는 싱크 노드가 주변 센서 노드의 수를 파악하기 위한 Hello 패킷을 센서 노드에게 방송하는 것으로 시작된다. 싱크

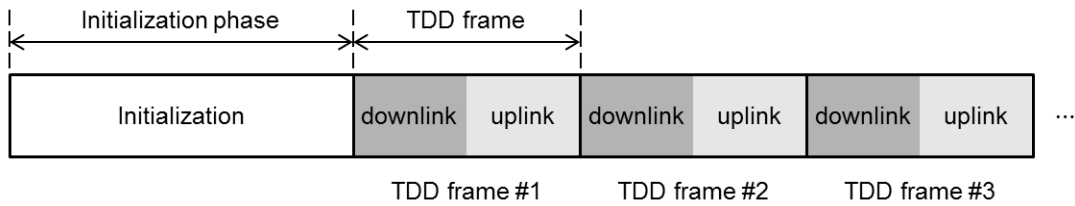


그림 2. 채널 구조  
Fig. 2. Channel structure of proposed scheme.

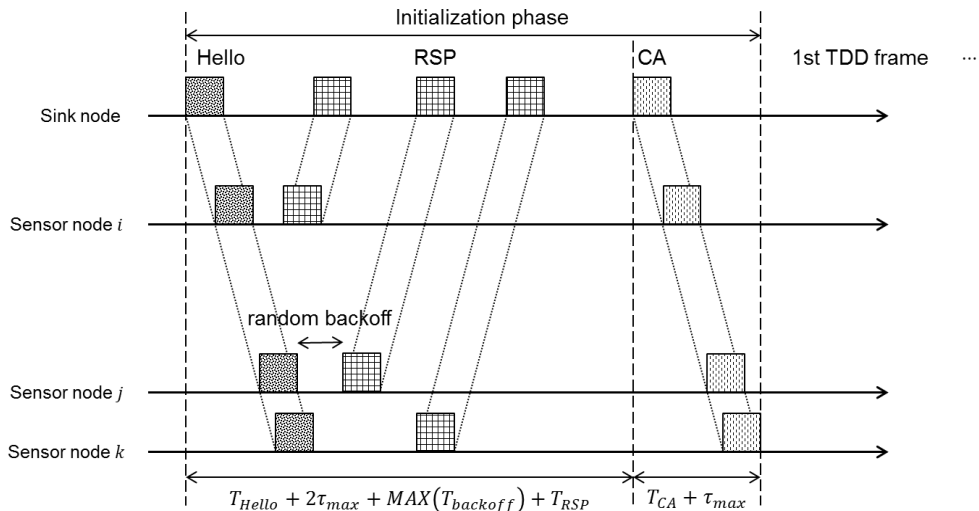


그림 3. 초기화 단계 구조  
Fig. 3. Initialization phase structure.

노드로부터 Hello 패킷을 수신한 센서 노드는 이에 대한 응답으로 자신의 전송 전력 크기를 포함하여 RSP (response) 패킷을 전송한다. 초기화 단계에서는 센서 노드가 자신의 위치 정보를 알 수 없으므로 최대 전송 전력으로 RSP 패킷을 전송한다. 또한 싱크 노드로부터 동일한 거리에 위치하는 센서 노드들의 RSP 패킷 충돌을 피하기 위해 랜덤 백오프(random backoff) 기법을 사용하여 임의의 시간만큼 대기한 뒤 RSP 패킷을 전송한다. 싱크 노드는 수신한 RSP 패킷의 수를 통해 센서 노드의 수를 파악할 수 있으며, 이를 활용하여 시스템 용량을 최대화하는 수신 전력의 크기를 계산할 수 있다. 일반적인 CDMA 시스템에서 싱크 노드에서의 비트 에너지 대 잡음비( $E_b/N_0$ )는 각 센서 노드로부터 수신한 데이터 패킷의 수신 전력과 주변 소음(noise)의 크기, 간섭의 크기를 활용하여 나타낼 수 있다(수식 (1)).

$$E_b/N_0 = \frac{S/R}{\left[ \int_B N(f)df + S(n-1) \right] / BW} \quad (1)$$

여기에서  $S$ 는 수신 전력,  $R$ 은 각 센서 노드의 데이터 전송률(data rate),  $B$ 는 대역폭(bandwidth),  $n$ 은 전체 센서 노드의 수를 나타낸다.  $N(f)$ 는 수중 환경에서의 주변 소음(ambient noise)의 전력 파워 스펙트럼 밀도 (Power Spectral Density: PSD) 함수를 의미하며, 따라서 이를 주파수 대역에 대해 적분한  $\int_B N(f)df$ 는 해당 주파수 대역에서의 주변 소음의 크기를 나타낸다. 또한  $S(n-1)$ 은 하나의 센서 노드의 패킷에 대한 간섭(interference)을 의미하며, 수식 (1)은 싱크 노드가 동일한 수신 전력( $S$ )으로 센서 노드의 패킷을 수신했다고 가정하였을 경우의  $E_b/N_0$ 을 나타낸다. 시스템 용량을 최대화하는 수신 전력의 크기는 수식 (1)을 수신 전력에 대해 정리함으로써 구할 수 있으며, 수식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$S = \frac{(E_b/N_0)_{tar} \times R \times \int_B N(f)df}{\left[ B - (n-1) \times (E_b/N_0)_{tar} \times R \right]} \quad (2)$$

싱크 노드는 RSP 패킷의 수신 전력과 RSP 패킷에 포함된 전송 전력의 크기를 통해 각각의 센서 노드와 싱크 노드 사이의 경로 손실의 크기를 유추할 수 있으며, 유추한 경로 손실의 크기를 각 센서 노드에 할당되는

직교 코드 및 수식 (2)를 통해 계산한 수신 전력( $S$ )과 함께 CA (code assignment) 패킷에 포함하여 전송한다. CA 패킷을 수신한 센서 노드는 CA 패킷에 포함된 경로 손실 크기와 수신 전력 정보를 사용하여 초기 송신 전력의 크기를 다음 수식 (3)을 통해 계산할 수 있다.

$$10\log_{10}P_x = 10\log_{10}S + 10\log_{10}PL_x \quad (3)$$

여기에서  $P_x$ 는 센서 노드의 송신 전력,  $PL_x$ 은 각 센서 노드와 싱크 노드 사이의 경로 손실 크기를 나타낸다. 초기화 단계는 싱크 노드가 Hello 패킷을 전송하는 시점부터 싱크 노드로부터 가장 멀리 떨어진 센서 노드가 CA 패킷을 수신하는 시점까지이며, 초기화 단계의 경과 시간은 수식 (4)와 같다.

$$T_{Hello} + T_{RSP} + T_{CA} + 3\tau_{max} + MAX(T_{backoff}) \quad (4)$$

여기에서  $T_{Hello}$ ,  $T_{RSP}$ ,  $T_{CA}$ 는 각각 Hello, RSP, CA 패킷의 길이이며,  $\tau_{max}$ 는 최대 전송 지연 시간,  $MAX(T_{backoff})$ 는 랜덤 백오프의 최대 크기를 나타낸다.

## 2. TDD 프레임 구조

그림 4는 TDD 프레임의 구조를 나타낸다. 정확한 페루프 전력 제어 기법을 위해 TDD 프레임의 길이( $T_f$ )는 채널 변화를 의미하는 코히런스 시간(coherence time,  $T_c$ )보다 작다고 가정한다. DL (downlink) 패킷은 다음 2가지 정보를 포함한다. 첫째 싱크 노드와 센서 노드 사이의 전파 지연 시간( $\tau_x$ )을 계산하기 위한 패킷 전송 시각(time stamp)과 둘째 각 센서 노드와 싱크 노드 사이의 경로 손실의 크기이다. UL (uplink) 패킷은 싱크 노드가 경로 손실을 계산할 때 필요한 UL 패킷 전송 전력의 크기와 센서 노드의 데이터로 구성된다. 각 센서 노드는 DL 패킷에 포함된 패킷 전송 시각을 활용하여 자신과 싱크 노드 사이의 전파 지연 시간( $\tau_x$ )을 계산하고, 이 값을 이용하여 TDD 프레임의 길이( $T_f$ ) 및 전송 대기 시간( $T_{tx,x}$ )을 계산한다.(수식 (5), 수식 (6))

$$T_f = T_{DL} + T_{UL} + 2\tau_{max} + T_g \quad (5)$$

$$T_{tx,x} = T_f - T_g - T_{DL} - T_{UL} - 2\tau_x \quad (6)$$

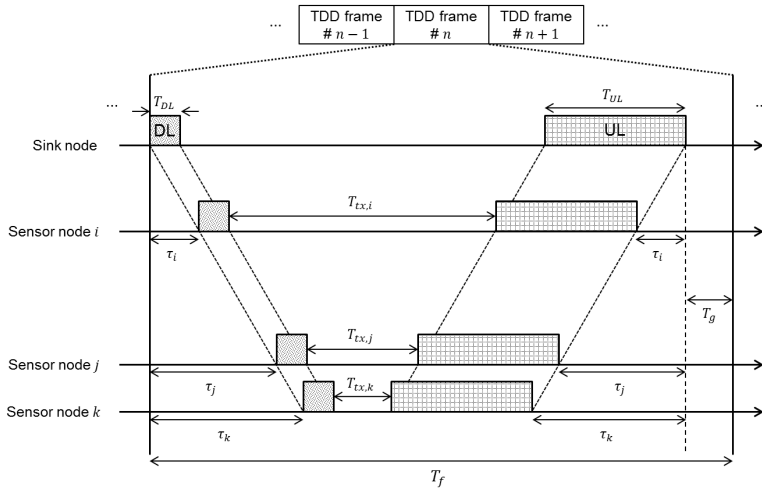


그림 4. TDD 프레임 구조  
Fig. 4. TDD frame structure.

여기에서  $T_{DL}$ 과  $T_{UL}$ 은 각각 DL 패킷 및 UL 패킷의 길이,  $T_g$ 는 보호 구간(guard time)의 길이,  $\tau_{max}$ 는 최대 전파 지연 시간을 의미한다. 센서 노드는 DL 패킷을 수신하고 계산된  $T_{Lx,x}$  시간만큼 대기한 뒤 UL 패킷을 전송함으로써 모든 센서 노드의 UL 패킷이 동시에 싱크 노드로 수신될 수 있도록 한다. 센서 노드는 DL 패킷에 포함된 싱크 노드와 각 센서 노드 사이의 경로 손실 크기와 초기화 단계에서 CA 패킷에 포함되어 있던 수신 전력 크기( $S$ )를 토대로 수식(3)을 이용하여 UL 패킷의 송신 전력을 계산한다. 이를 통해 시변 수중 음향 채널에서 효율적인 전력 제어를 수행할 수 있다.

#### IV. 성능 분석

##### 1. 모의실험 환경 및 파라미터

모의실험을 위한 시뮬레이터로 MATLAB 프로그램을 사용하며, 시뮬레이터는 일반적인 PC 환경에서 동작한다. 노드의 최대 통신 반경을 5 km로 설정하였으며 싱크 노드를 중심으로 총 10 개의 센서 노드를 임의로 배치하였다. CDMA 시스템의 요구 비트 에너지 대 잡음비( $(E_b/N_0)_{tar}$ )는 10 dB로 설정하였으며 주파수 대역은 5 - 25 kHz 대역의 20 kHz의 대역폭( $B$ )을 사용하였다. 코히런스 시간( $T_c$ )과 TDD 프레임의 길이( $T_f$ )는 20 초로 설정하였으며<sup>[15]</sup> 전체 모의실험 시간은 초기화 단계를 제외하고 1000초로 설정하였다. 따라서 모의 실험에서는 총 50개의 TDD 프레임으로 구성된다.

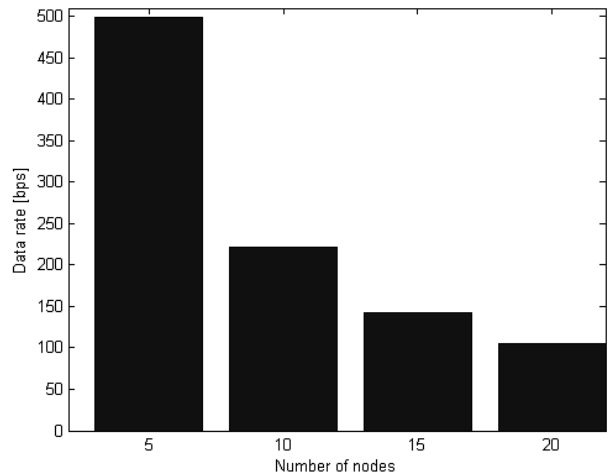


그림 5. 센서 노드 수에 따른 데이터 전송률  
Fig. 5. Data rate according to the number of sensor nodes.

모의실험의 입력 값으로서, 각 센서 노드의 데이터 전송률을 구하기 위해 싱크 노드에서의 신호 대 잡음비 (Signal to noise ratio: SNR)가 20 dB가 되도록 하는 수신 전력을 설정하였다. 각 CDMA 시스템의 요구 비트 에너지 대 잡음비를 만족하는 데이터 전송률은 수식 (1)을 데이터 전송률에 대해 정리함으로써 구할 수 있으며, 수식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$R = \frac{S \times B}{\left[ \int_B N(f) df + (n-1) \times S \right] \times (E_b/N_0)_{tar}} \quad (7)$$

그림 5는 수식 (7)로부터 얻어진 센서 노드 수에 따른 최대 데이터 전송률을 나타낸다. 센서 노드의 수가

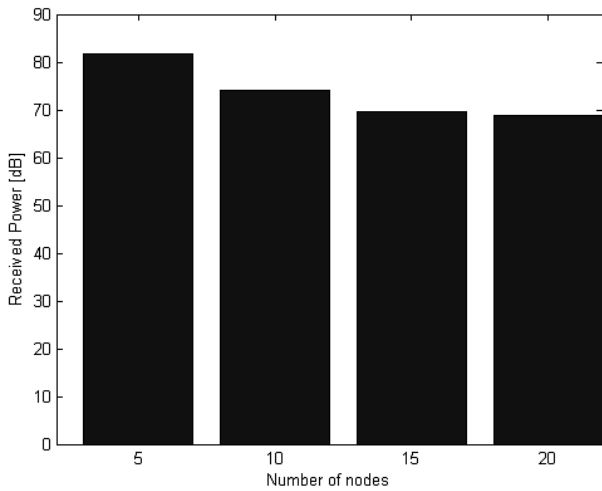


그림 6. 센서 노드 수에 따른 수신 전력 크기  
Fig. 6. Received signal strength according to the number of sensor nodes.

10 개인 경우 최대 가용 데이터 전송률은 약 220 bps이며, 모의실험에서는 200 bps의 전송률을 사용한다. 이를 활용하여 싱크 노드는 CDMA 시스템의 용량이 최대가 되는 수신 전력의 크기를 수식 (2)를 통해 계산할 수 있으며 그 결과를 그림 6에 나타냈다. 센서 노드의 수가 10 개인 경우 수신 전력의 크기가 약 73 dB이므로 이 값을 시뮬레이션에 사용했다. 싱크 노드는 이 값을 CA 패킷에 포함시켜 센서 노드에 알려줌으로써 향후 TDD 프레임에서 센서 노드의 전력 제어를 가능하게 한다.

## 2. 시변 수중 음향 채널 구현

제안 기법의 모의실험 분석을 위해서는 시변 수중 음향 채널의 구현이 요구된다. 이를 위해 그림 7과 같이 싱크 노드는 수면에 위치하며 센서 노드는 수면에 고정(anchor)되어 있는 3차원 네트워크 구조를 고려한다. 본문에서 채널의 변화는 센서 노드의 움직임에 의해서만 발생한다고 가정한다. 센서 노드는 그림 8에 나타낸 것과 같이 코히런스 시간 간격마다 미리 설정한 가상의 범위 내 임의의 지점에 위치하며, 현재 시점에서의 위치는 이전의 위치에 영향을 받지 않는다고 가정한다<sup>[16]</sup>. 시변 수중 음향 채널의 구현을 위한 채널 구현 시뮬레이터로서 Bellhop ray tracing tool<sup>[17]</sup>을 사용하여 동해 위도 36.7도, 경도 129.7도, 평균 수심 200 m 해역의 데이터를 사용한다(그림 9). 그림 9의 오른쪽 그래프는 Bellhop ray tracing tool의 입력 값 중 하나인 수심

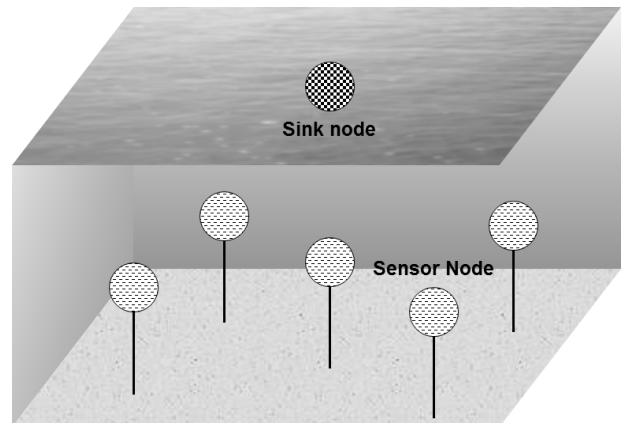


그림 7. 3차원 네트워크 구조  
Fig. 7. 3-D network topology.

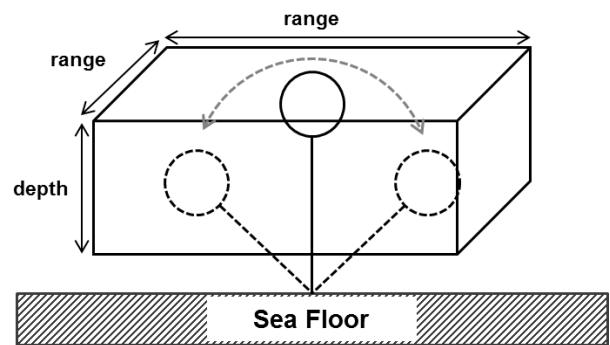


그림 8. 센서 노드 움직임 모델  
Fig. 8. Sensor node movement model.

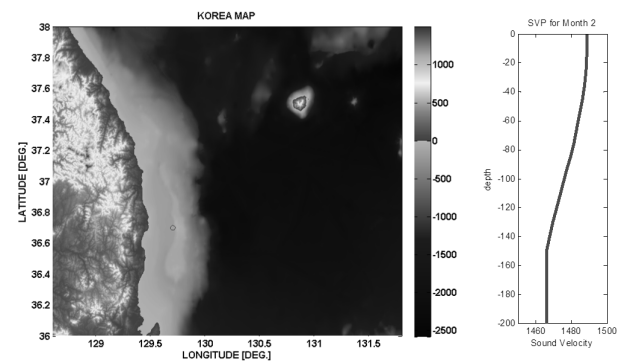
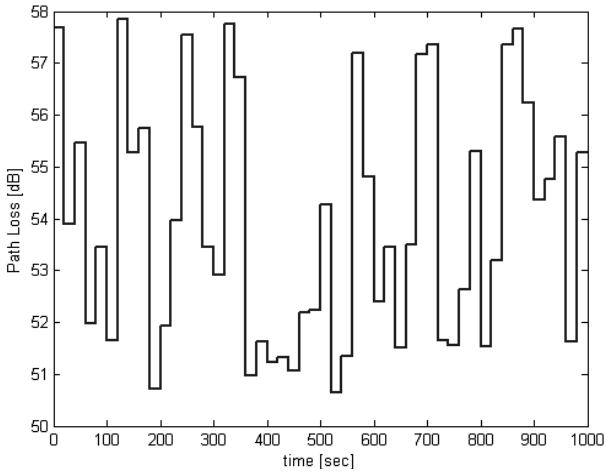


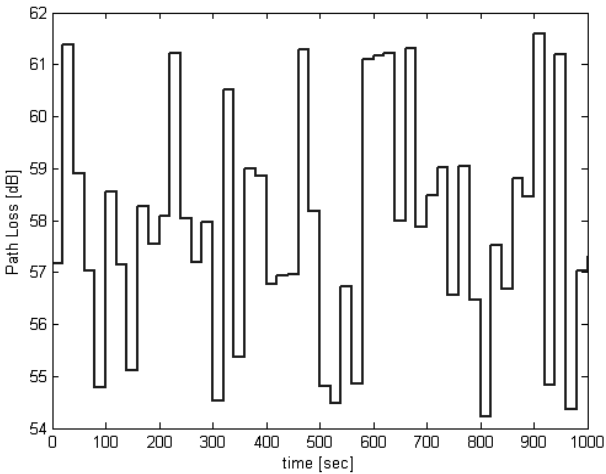
그림 9. 시변 수중 채널 생성에 사용된 해역  
Fig. 9. Target spot for time-varying underwater channel.

에 따른 음파 속도의 변화(Sound Velocity Profile: SVP)를 나타내는 그래프이며, 모의실험에서는 2월의 데이터를 사용한다. 센서 노드의 움직임을 위한 가상의 범위는 가로, 세로, 높이 5m × 5m × 1m로 설정한다.

그림 10은 구현된 시변 수중 음향 채널 중 비슷한 거리에 위치한 센서 노드의 채널을 비교한 것이다. 각각의 시변 채널은 코히런스 시간마다 경로 손실의 값이



(a) 싱크 노드로부터의 거리 : 1.25 km



(b) 싱크 노드로부터의 거리 : 1.45 km

그림 10. 시변 수중 채널

Fig. 10. Time-varying underwater channels.

변하며 코히런스 시간동안은 채널의 변화가 나타나지 않는다. Thorp's formula<sup>[4]</sup>를 사용하여 경로 손실을 구하는 경우 서로 다른 센서 노드가 동일한 주파수 대역을 사용하고 싱크 노드와의 거리가 비슷하면 두 센서 노드의 경로 손실의 값은 거의 동일하다. 하지만 구현된 시변 채널은 비슷한 거리에 위치한 센서 노드라 할지라도 센서 노드의 움직임으로 인한 채널 변화가 고려되어 서로 다른 채널이 구현되는 것을 확인할 수 있다.

3. 모의실험 결과

제안 기법의 성능 분석 지수로서 TDD 프레임 내에서 전송한 전체 UL 패킷과 싱크 노드로 성공적으로 수신된 UL 패킷의 비율을 나타내는 패킷 전달률(Packet

Delivery Ratio: PDR)을 사용하며 수식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$PDR = \frac{M}{N} \times 100 \tag{8}$$

여기에서  $N$ 은 하나의 TDD 프레임에서 전송된 전체 UL 패킷의 수,  $M$ 은 싱크 노드로 성공적으로 수신된 UL 패킷의 수를 의미한다. UL 패킷을 수신한 싱크 노드는 각각의 UL 패킷의 수신 전력을 측정하고  $E_b/N_0$ 을 계산하여 요구  $E_b/N_0$  (10 dB)보다 큰 경우, 패킷이 성공적으로 수신되었다고 판단한다.

그림 11은 본 논문에서 제안한 페루프 전력 제어를 사용하는 경우와 그렇지 않은 경우에 대한 패킷 전달률을 나타낸다. 제안 기법의 경우 DL 패킷에 포함된 싱크

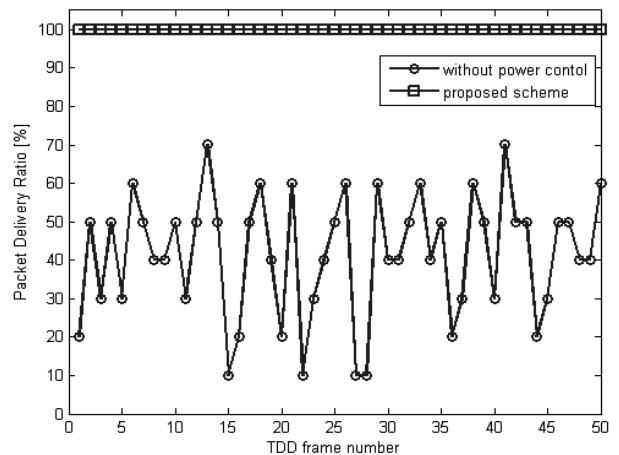


그림 11. 패킷 전달률

Fig. 11. Packet delivery ratio.

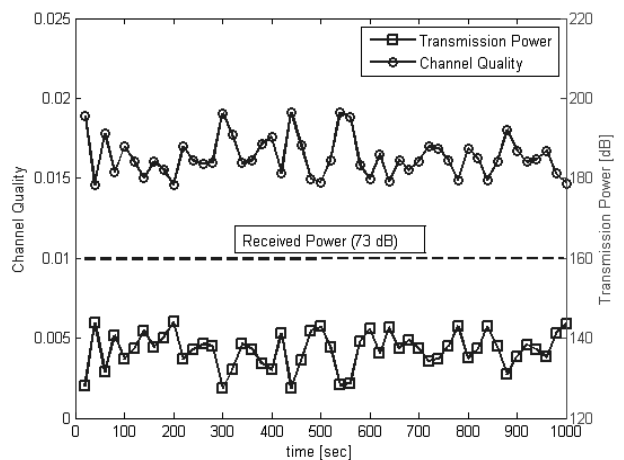


그림 12. 채널 상태에 따른 전송 전력 크기

Fig. 12. Transmission power strength comparing with channel quality.

노드와 센서 노드 사이의 경로 손실 크기를 바탕으로 전력 제어를 수행하므로 모든 UL 패킷이 성공적으로 수신되지만 전력 제어를 수행하지 않은 경우, 전체적으로 70 % 미만의 패킷 전달률을 보이며 10 %로 떨어지는 경우도 있음을 확인할 수 있다.

그림 12는 채널의 시변 상황에 따라 적응적으로 전송 전력이 변화하는 것을 보여 준다. 그림의 왼쪽 y축 값은 경로 손실의 역수이며 이는 채널의 품질을 의미한다. 즉, 경로 손실의 크기가 큰 경우 채널의 품질은 낮으며, 경로 손실의 크기가 작은 경우 채널의 품질이 높다. 그림의 오른쪽 y 축은 전송 전력의 크기를 나타낸다. 그림 12에서 확인할 수 있듯이 채널의 품질이 변함에 따라 전송 전력의 크기를 이에 적응적으로 제어함으로써 그림에서 점선으로 표시된 싱크 노드에서의 수신 전력이 항상 일정하게 유지됨을 확인할 수 있다.

## V. 결 론

본 논문에서는 시변 수중 음향 채널 환경에서 TDD-CDMA 시스템의 페루프 전력 제어 기법을 제안하고 이에 대한 성능을 분석하였다. 제안 기법은 1-홉 네트워크 구조에서 초기화 단계와 반복되는 TDD 프레임에서의 하향 링크-상향 링크 패킷 교환을 통해 CDMA 시스템의 용량이 최대가 되는 수신 전력을 계산하고 시간에 따라 변하는 경로 손실의 크기를 센서 노드에게 알려줌으로써 효과적인 센서 노드 전송 전력 제어가 가능하였다. 또한 3차원 토폴로지에서 센서 노드의 움직임을 모델링하여 시변 수중 음향 채널을 구현하고 이를 모의실험에 반영하였다. 제안 기법의 성능 분석은 구현된 시변 채널 환경에서 하나의 TDD 프레임에서 전송된 전체 UL 패킷의 수와 요구  $E_b/N_0$ 을 만족하는 UL 패킷의 비율(패킷 전달률)을 비교하고 채널 품질의 변화에 따른 송신 전력이 적응적으로 조절되는 것으로 확인하는 것으로 진행되었다. 전력 제어 기법을 사용하지 않은 경우 패킷 전달률이 10 %까지 하락하는 경우가 나타나는 반면, 제안 기법을 사용하였을 경우 모든 TDD 프레임에서 100 %의 패킷 전달률을 얻을 수 있었다.

## REFERENCES

- [1] I. F. Akyildiz, D. Pompili, and T. Melodia, "Underwater Acoustic Sensor Networks: Research Challenges," *Ad Hoc Networks (Elsevier)*, Vol. 3, pp. 257-279, Jan. 2005.
- [2] L. Xavier, *An Introduction to Underwater Acoustics - Principles and Applications*, Springer Praxis, New York, 2002.
- [3] M. Stojanovic and C. J. Preisig, "Underwater Acoustic Communication Channels: Propagation Models and Statistical Characterization," *IEEE Comm Mag.*, Vol. 47, pp. 84-89, Feb. 2009.
- [4] M. Stojanovic, "On the Relationship Between Capacity and Distance in an Underwater Acoustic Communication Channel," *ACM SIGMOBILE Mobile Comput. and Comm. Rev.*, Vol. 11, no. 4, pp. 34-43 Oct. 2007
- [5] J. A. Rice and W. O. Che, "A Discovery Process for Initializing Underwater Acoustic Networks," in *Proc. of 2010 4th International Conf. on SENSORCOMM*, pp. 408-415, Venice, Italy, Jul. 2010.
- [6] F. Guerra, and P. Casari, "Performance Comparison of MAC Protocols for Underwater Networks Using a Realistic Channel Simulator," in *Proc. of MTS/IEEE OCEANS Conf.: Marine Technology for our Future: Global and Local Challenges*, pp. 1-8, Biloxim USA, Oct. 2009.
- [7] G. Xie, J. Gibson, and L. Diaz-Gonzalez, "Incorporating Realistic Acoustic Propagation Models in Simulation of Underwater Acoustic Networks: A Statistical Approach," in *Proc of OCEANS 2006*, pp. 1-9, Boston, USA, Sept. 2006.
- [8] J. Llor and M. P. Malumbres, "Performance Evaluation of Underwater Wireless Sensor Networks with OPNET," in *Proc. of 4th Int. ICST Conf. on Simulation Tools and Techniques*, pp. 19-26, Athens, Greece, Aug. 2011.
- [9] J. -I. Namgung, N. -Y. Yun, and S. -H. Park, "P-MAC: Adaptive MAC Protocol based on Underwater Environment Information for Underwater Acoustic Sensor Networks," in *Proc. of IEIE Summer Conference 2009*, pp. 673-674, Jeju, Korea, Jul. 2009.
- [10] E. Sozer, J. Proakis, M. Stojanovic, J. Rice, A. Benson, and M. Hatch, "Direct Sequence Spread Spectrum Based Modem for Underwater Acoustic Communication and Channel



- Measurements,” in *Proc. of MTS/IEEE OCEANS’99*, pp. 228-233, Seattle, USA, Sept. 1999.
- [11] Z. A. Muqattash, M. Krunz, and W. E. Ryan, “Solving the near-far problem in CDMA-based ad hoc networks,” *Ad Hoc Networks (Elsevier)*, Vol. 1, no. 4, pp. 435-453, 2003.
- [12] K. -J. Lim, I. -B. Hyun, and K. -S. Kwak, “Generalized Model for DS/CDMA Cellular System Considering Base-received Power Control and Pilot Power Control,” in *Proc. of IEIE Conference 1996*, pp. 27-30, Sept. 1996.
- [13] X. Wei, L. Zhao, X. Li, and C. Zou, “A Distributed Power Control Based MAC Protocol for Underwater Acoustic Sensor Networks,” in *Proc. of IEEE International Conf. on ICCSC 2008*, pp. 688-692, Shanghai, China, May 2008.
- [14] D. Pompili, “A CDMA-based Medium Access Control for Underwater Acoustic Sensor Networks,” *IEEE Trans. on Wireless Communications*, Vol. 8, no. 4, pp. 1899-1909, Apr. 2009.
- [15] S. Morten and J. Trond, “Characterization of long-range time-varying underwater acoustic communication channels,” *J. of the Acoustical Society of America*, vol. 123, no. 5, pp. 6097-6102, May 2008.
- [16] J. Llor and M. P. Malumbres, “Statistical Modeling of Large-Scale Signal Path Loss in Underwater Acoustic Networks,” *Sensors*, Vol. 13, no. 2, pp. 2279-2294 Feb. 2013.
- [17] M. B. Porter, “Bellhop code,” <http://oalib.hlsresearch.com/Rays/index.html>

---

 저 자 소 개
 

---



서 보 민(정회원)

2009년 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 공학사

2011년 경북대학교 IT대학 전자전기컴퓨터학부 공학석사

2011년~2013년 국방 수중 통신/탐지 특화 연구 센터 전문 연구요원

2013년~현재 경북대학교 대학원 전자공학부 박사과정

&lt;주관심분야 : 수중 음향 센서 네트워크, 수중 CDMA 시스템, 수중 매체접속제어 기법&gt;



조 호 신(평생회원)

1992년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학사

1994년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학석사

1999년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학과(박사)

1999년~2001년 한국전자통신 연구원 선임연구원

2001년~2003년 한국항공대학교 전자정보통신 컴퓨터공학부 전임 강사

2003년~2012년 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 부교수

2010년~2011년 미국 커네티컷 대학 방문교수

2012년~현재 경북대학교 IT대학 전자공학부 교수

&lt;주관심분야 : 수중 음향 센서 네트워크, 5G 통신 시스템, D2D 통신, 분자 통신&gt;