

수중 음향 센서 망에서의 코드 분할 다중 접속 기법에 대한 성능 해석

준회원 서보민*, 종신회원 조호신**

Performance Analysis on Code-Division Multiple Access in Underwater Acoustic Sensor Network

Bomin Seo* Associate Member, Ho-shin Cho** Lifelong Member

요약

수중 통신에서 사용되는 음향 신호의 감쇠는 노드 사이의 거리는 물론 사용 주파수 대역에도 크게 영향을 받는다. 또한 음향 신호는 긴 전송 지연을 가지므로 복잡한 절차와 많은 제어 메시지를 필요로 하는 매체 접속 기법은 사용하기에 적합하지 않다. 본 논문은 이처럼 열악한 수중 환경에서 코드 분할 다중 접속 기법의 적용 방법을 제시하고 그 성능을 분석한다. 수중 음향 센서망 구조는 데이터 수집형 트리 구조를 가정하며 에너지 절약을 위해 트리 구조에서 계층간 엇갈림 깨어남 패턴을 사용한다. 성능 분석을 위해 다양한 사용 주파수 대역에서 계층별 데이터 전송률을 수학적으로 도출한다.

Key Words : underwater, acoustic sensor networks, CDMA, MAC, tree-topology

ABSTRACT

Acoustic signal, which is a main carrier of underwater communication, attenuates along the traveled path heavily depending on the frequency as well as inter-node distance. In addition, since it has a long propagation delay, the conventional medium access control (MAC) schemes requiring complex signaling procedures and accordingly heavy overhead messages would not be appropriate in underwater communications. In this paper, we propose a code division multiple access (CDMA) scheme as a solution for MAC of underwater communication and evaluate the performance. A hierarchical data-gathering tree topology is considered and a staggered wake-up pattern is employed for the purpose of energy saving. As a performance measure, the data rate at each level of hierarchical topology is derived.

I. 서론

최근 해양 자원에 대한 개발 및 관리의 중요성이 부각되면서 해양 환경 감시, 자원 조사, 재난 방지, 해양 탐지 등을 위한 수중 음향 센서 네트워크의 기술적 수요가 증가하고 있다^[1]. 또한 군 전송 분야에서는 현대화된 네트워크전의 개념이 해양으로 확대되어 수중

센서 네트워크에 대한 중요성이 더욱 커지고 있으며 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다^[2].

이러한 다양한 응용 분야에서 수중 센서 네트워크가 효율적으로 구현되기 위해서는 임의로 분포된 방대한 양의 센서 노드들 사이의 신뢰성 있는 통신 링크 관리가 우선되어야 한다. 하지만 수중 통신에 사용되는 음파 신호는 전파 속도가 매우 느리므로 필연적으

※ 본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다. (계약번호 UD100002KD)

* 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 이동통신 연구실(bmseoo@ee.knu.ac.kr), ** 경북대학교(hscho@ee.knu.ac.kr)

논문번호: KICS2010-03-118, 접수일자: 2010년 3월 25일, 논문최종접수일자: 2010년 8월 9일

로 큰 전송 지연을 유발한다³⁾. 또한 음파 신호는 높은 주파수 대역에서 큰 경로 손실을 겪게 되므로 사용 가능한 주파수 대역이 제한된다. 이 밖에도 음향 채널은 다중 경로 전파, 도플러 확산, 과도한 시변 특성으로 인해 신호의 왜곡이 매우 심하다⁴⁾. 따라서 열악한 수중 환경에서의 효율적인 통신 방식의 설계는 수중 센서 네트워크의 성공적 기능 수행을 위해 매우 중요하다.

특히 수중 환경에서의 다중 접속 프로토콜은 높은 데이터 전송률과 더불어 작은 매체 접속 지연, 적은 에너지 소비, 경쟁 노드 사이의 공정성과 같은 특성들을 요구한다. 하지만 지속적인 반송파 감지(Carrier Sensing)와 RTS/CTS (Request-to-send/Clear-to-send)와 같은 제어 메시지를 교환하는 지상 센서 네트워크에서의 경쟁 기반 매체 접속 기법은 수중 환경의 큰 전송 지연과 높은 비트 오류율로 인해 낮은 데이터 처리율을 초래한다⁵⁾. 비경쟁 기반 매체 접속 기법으로 주파수 분할 다중 접속(Frequency division multiple access: FDMA) 방식은 절대적 주파수 대역이 부족한 수중 환경에서 적합하지 않으며¹⁾ 시분할 다중 접속(Time division multiple access: TDMA) 방식은 엄격한 시간 동기를 요구하므로 이로 인한 시그널링 오버헤드가 매우 크다¹⁾. 코드 분할 다중 접속(Code Division Multiple Access: CDMA) 방식은 주파수 선택적 페이딩(Frequency Selective Fading)에 강할 뿐만 아니라 여러 노드가 연속적으로 전송하는 신호를 직교 코드를 사용하여 쉽게 구별할 수 있고 주파수 재사용 효율이 좋으므로 수중 환경에서의 유망한 매체 접속 방식으로 활발히 연구되고 있다^{1,6)}.

본 논문에서는 데이터 수집형 트리 구조에서 동일 계층 노드간의 매체 접속 방식으로 코드 분할 다중 접속 방식을 제안한다. 또한 각 노드의 에너지 소비를 줄이기 위해 슬립 모드 기법을 사용하되 수중에서의 긴 전송 시간을 고려하여 계층간 엇갈림 깨어남 패턴(Staggered wake-up pattern)⁷⁾을 적용한다. 각 센서 노드는 단일 직교 코드만을 사용하여 데이터를 전송한다고 가정한다. 최종적으로, 제안 방식의 성능 분석을 위해 데이터 수신 노드에서의 전력이 동일한 경우에 대해서 주어진 신호 대 잡음비 아래에서 주파수 대역을 나누어 각 계층간의 데이터 전송률을 수학적으로 도출한다. 이를 통해 각 주파수 대역과 계층간에 따른 데이터 전송률을 분석함으로써 이에 대한 상관 관계를 알 수 있으며, 이를 이용하여 싱크 노드에서의 데이터 전송 효율에 대한 분석을 수행한다.

본 논문은 서론에 이어 본문의 1장에서, 해석하고자 하는 매체 접속 기법의 토폴로지 구성 및 엇갈림

깨어남 패턴과 수중 환경에서의 감쇠 및 소음 등의 시스템 모델에 대해서 살펴본 뒤, 2장에서는 수신 전력이 동일한 경우에 대한 각 계층 간의 데이터 전송률을 알아본다. 3장에서는 수치해석 결과를 통해 주파수 대역에 따른 계층 간의 데이터 전송률을 분석하고 마지막으로 결론을 맺는다.

II. 본 론

2.1 시스템 모델

2.1.1 네트워크 토폴로지와 전송 스케줄

그림 1은 본 논문에서 고려하는 수중 센서 네트워크의 계층 구조를 나타낸다. 여기서는 임의로 분포된 노드들이 주변 해양환경의 데이터를 수집하고 그 결과를 다중 홉 릴레이를 통해 싱크 노드로 전달하는 데이터 수집형 트리 구조를 가정한다⁸⁾. 네트워크의 구조를 단순화시키기 위해 첫 번째 계층(L₁)에는 싱크 노드가, 싱크 노드를 제외한 하위 계층에는 소스 노드가 존재한다고 가정하고 최하위 계층(L_k)에서부터 첫 번째 계층까지 데이터가 전송되는 단방향 트래픽 흐름만을 고려한다. 본 논문에서는 데이터를 전송하는 노드를 자식 노드, 수신하는 노드를 부모 노드라 정의하고 하나의 부모 노드에는 다수의 자식 노드가 연결될 수 있다.

그림 2는 본 논문에서 채택하는 슬립 모드 방식을 나타낸다. 모든 노드는 유휴 청취(idle listening)에 의한 전력 낭비를 막기 위해 주기적으로 깨어나고 슬립 모드로 전환되도록 동기화되어 있다. 이때 노드가 깨어있는 구간(awake)을 다시, 수집한 데이터를 전송하는 구간(transmission period)과 다른 노드로부터 데이터를 수신하는 구간(reception period)으로 나눈다. 각 계층의 부모 노드는 자식 노드로부터 데이터가 도착할 시간에 깨어나 데이터를 수신하게 되며 이때 수중에서의 음파 전달 속도가 매우 느린 점을 고려하여 계

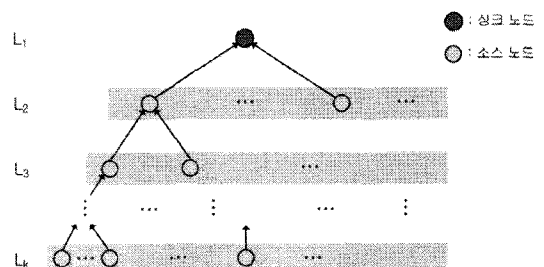


그림 1. 데이터 수집형 계층 트리 구조

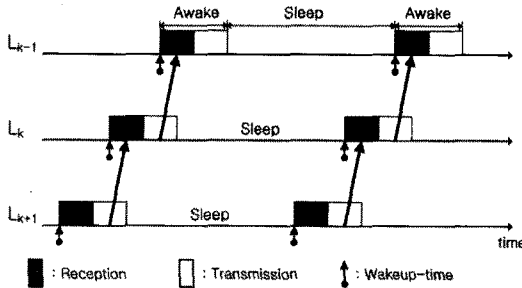


그림 2. 엇갈림 깨어남 패턴을 이용한 슬립 모드 방식

층별로 깨어나는 시각(wake-up time)을 엇갈리도록 조절한다. 이 때, 수중에서의 음파 전달 속도의 가변성을 고려하여 노드의 깨어남 시점을 결정할 때 마진을 두고 설계할 수 있다. 수중 환경에서의 통신 노드 사이의 동기화에 대해서는 클럭 스큐와 오프셋까지 고려한 많은 연구가 진행되었으며, 본 논문에서는 부모 노드와 자식 노드 사이의 완벽한 동기를 가정한다 [7,9-11]. 상기의 엇갈림 깨어남 패턴(staggered wake-up pattern)을 이용하여 최하위 계층 노드에서 싱크 노드까지의 단 대 단 지연(end-to-end delay)을 최대한 줄이면서 슬립 모드 방식을 효율적으로 운용할 수 있다 [2,7].

하나의 부모 노드에 연결된 다수의 자식 노드들은 거리에 상관없이 부모 노드에 데이터가 동시에 도착하도록 전송 시점이 결정된다. 즉, 같은 계층의 노드라 하더라도 부모 노드까지의 거리에 따라 깨어남 시각이 달라진다[2].

2.1.2 다중 접속 기법

1.1 절에서 설명한 바와 같이 계층간 엇갈림 깨어남 패턴을 사용하므로, 개념 상 시분할하여 자원을 사용하는 것으로서 계층간 간섭은 발생하지 않는다. 다만 동일 계층 내의 노드간에는 간섭이 유발되므로 그 해결방법으로 본 논문에서는 코드 분할 다중 접속 방식을 적용하고자 한다. 전송 데이터는 각 노드마다 할당된 직교 코드에 의해서 주파수 확산된다.

2.1.3 수중 환경에서의 감쇠(Attenuation)와 소음(Noise)

신호 감쇠의 크기가 주로 두 노드 사이의 거리에 영향을 받는 지상 환경과는 달리 수중 환경에서의 감쇠는 두 노드 사이의 거리뿐만 아니라 통신에 사용되는 주파수 대역에도 크게 영향을 받는다. 두 노드 사이의 거리가 l , 신호의 주파수가 f 일 때 신호 감쇠의 크기 $A(l, f)$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$A(l, f) = l^k a(f)^l \tag{1}$$

위 수식에서 k 는 음파 신호의 확산 계수로서 1과 2 사이의 값을 가지며 1은 원통형 확산, 2는 구형 확산을 의미한다. 일반적인 확산 계수로는 1.5의 값을 사용한다. 또한 $a(f)$ 는 감쇠 계수를 의미하며 다음과 같은 수식으로 표현할 수 있다[12].

$$10\log a(f) = 0.11 \frac{f^2}{1+f^2} + 44 \frac{f^2}{4100+f^2} + 2.75 \times 10^{-4} f^2 + 0.003 \tag{2}$$

감쇠 계수 $a(f)$ 는 주파수 대역이 높아질수록 급격히 증가하여 수중 음향 통신에서 사용할 수 있는 최대 주파수를 제한하는 주요한 원인이 된다. 주파수 대역이 BW 이고 송신 신호의 전력 스펙트럼 밀도가 $G(f)$ 일 때 송신 전력 P_t 는 다음과 같이 계산된다.

$$P_t = \int_{<f, BW>} G(f) df \tag{3}$$

송신 신호의 전력 스펙트럼 밀도가 주파수 대역 내에서 일정한 상수 값을 가진다고 가정하면 송신 신호의 전력 스펙트럼 밀도는 다음과 같다.

$$G(f) = \frac{P_t}{BW} \tag{4}$$

따라서 거리 l 만큼 떨어진 수신 노드에서의 수신 전력 P_r 은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_r = \int_{<f, BW>} \frac{G(f)}{A(l, f)} df = \frac{P_t}{BW} \int_{<f, BW>} A^{-1}(l, f) df \tag{5}$$

수중에서의 소음은 난류(turbulence), 선박의 움직임(shipping), 파도(wave), 열(thermal noise)에 의해서 발생한다. 다음은 각 요인에 의한 소음의 전력 스펙트럼 밀도를 차례로 나타낸다[13].

$$\begin{aligned} 10\log N_t(f) &= 17 - 30\log f \\ 10\log N_s(f) &= 40 + 20(s - 0.5) + 26\log f \\ &\quad - 60\log(f + 0.03) \\ 10\log N_w(f) &= 50 + 7.5w^{1/2} + 20\log f \\ &\quad - 40\log(f + 0.4) \\ 10\log N_{th}(f) &= -15 + 20\log f \end{aligned} \tag{6}$$

수식에서의 s 는 선박의 움직임을 나타내며 0과 1 사이의 값을 가지고, w 는 바람의 속도를 나타낸다. 수중 환경에서의 전체 소음 전력 스펙트럼 밀도 $N(f)$ 는 각 요소에 대한 소음 성분을 모두 더한 값이 된다.

$$N(f) = N_t(f) + N_s(f) + N_w(f) + N_{th}(f) \quad (7)$$

2.2 성능 해석

본 논문에서는 다수의 자식 노드가 부모 노드에게 데이터를 전송하기 위해 각각의 단일 직교 코드를 사용하는 코드 분할 다중 매체 접속 방식을 사용한다. 또한 완벽한 전력 제어를 통해 부모 노드에서의 수신 전력은 자식 노드와의 거리에 상관없이 모두 동일하다고 가정한다. 이때 사용되는 전력 제어 기법으로 분산 알고리즘(distributed algorithm)을 사용하며, 이를 통해 수신 노드에서의 전력을 일정하게 유지할 수 있다⁶⁾. 또한 각 노드에 사용되는 직교 코드는 트리 구조 네트워크 구성 초기화 시 첫 번째 계층에 존재하는 싱크 노드에 의해 각 노드에 영구적으로 할당되며, 할당되는 코드의 수는 충분하다고 가정한다⁶⁾. 일반적으로 코드 분할 다중 접속 방식에서는 모든 사용자가 동일 주파수 대역에서 동시에 신호를 전송하므로 특정 사용자에 대해서 다른 사용자들의 전송 신호는 모두 간섭으로 작용하게 된다. 따라서 각 사용자의 송신 전력은 시스템이 요구하는 수신 노드에서의 허용 신호 대 잡음비(E_b/N_0)를 유지할 수 있는 범위 안에서 제한된다. 해석하고자 하는 기법에서는 동일 계층내의 노드 간 간섭은 가산성 백색 가우시안 잡음(AWGN: Additive White Gaussian Noise)의 형태로 발생된다고 가정한다¹⁴⁾.

그림 3은 모든 부모 노드에서 자신의 자식 노드로부터 수신되는 전력 P_r 이 모두 일정한 크기를 가지는 상수 S 로 동일하다고 가정했을 때 k 번째 계층과 $(k-1)$ 번째 계층 사이에서 발생할 수 있는 간섭의 예를 나타낸다. 노드 j 는 노드 i 와 $(i+1)$ 의 부모 노드

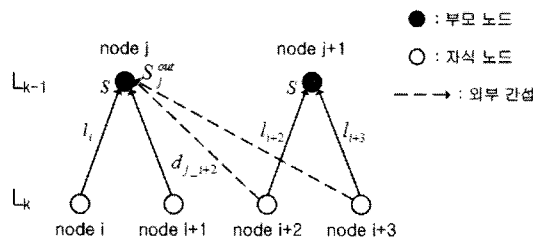


그림 3. k 번째 계층과 $k-1$ 번째 계층 사이에서 발생할 수 있는 간섭의 예

로 자식 노드와 함께 하나의 가족(family)을 형성한다. 마찬가지로 노드 $(j+1)$ 은 노드 $(i+2)$ 와 노드 $(i+3)$ 과 함께 가족을 형성한다. 노드 i 와 노드 j 사이의 통신에 대해서 같은 가족인 노드 $(i+1)$ 의 노드 j 로의 전송 전력은 내부 간섭(intra-family interference)으로 작용하며, 노드 $(i+2)$ 와 노드 $(i+3)$ 의 노드 $(j+1)$ 로의 전송 전력 역시 외부 간섭(inter-family interference)으로 작용한다.

부모 노드 j 가 갖는 자식 노드의 수를 $n(j)$ 라 할 때, 노드 j 에서의 내부 간섭의 크기 I_{intra} 는 전체 자식 노드들로부터의 수신 전력 $S \cdot n(j)$ 에서 기준 자식 노드로부터의 수신 전력 S 를 제외한 값이 되므로 수식 (8)과 같이 표현할 수 있다.

$$I_{intra} = S[n(j) - 1] \quad (8)$$

외부 간섭은 이웃한 가족 내의 자식 노드들로부터 해당 부모 노드로의 전송 전력에 의해 발생한다. 그림 3에서 노드 j 에서의 수신 전력 P_r 이 S 이므로 자식 노드 $(i+2)$ 의 송신 전력 P_{i+2} 는 수식 (5)를 이용하여 아래와 같이 구할 수 있다.

$$P_{i+2} = \frac{S \cdot BW}{\int_{<f, BW>} A^{-1}(l_{i+2}, f) df} \quad (9)$$

여기에서 l_{i+2} 는 노드 $(i+2)$ 에서 부모 노드 $(j+1)$ 까지의 거리이다. 노드 $(i+2)$ 와 노드 j 사이의 거리를 $d_{j,i+2}$ 라 표현하면 노드 $(i+2)$ 에 의해 노드 j 에 영향을 미치는 외부 간섭 S_{j-i+2}^{out} 는 수식 (5)를 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$S_{j-i+2}^{out} = P_{i+2} \int_{<f, BW>} A^{-1}(d_{j-i+2}, f) df = S \cdot BW \frac{\int_{<f, BW>} A^{-1}(d_{j-i+2}, f) df}{\int_{<f, BW>} A^{-1}(l_{i+2}, f) df} \quad (10)$$

$F^{out}(j)$ 를 노드 j 에 영향을 주는 인접 가족의 자식 노드 집합이라고 정의하면 외부 간섭의 전체 크기 I_{inter} 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$I_{inter} = \sum_{m \in F^{out}(j)} S_{j-m}^{out} \quad (11)$$

한편, 소음의 크기는 소음의 전력 스펙트럼 밀도 $N(f)$ 를 주파수 대역에 대해 적분함으로써 구할 수 있으므로,

$$N = \int_{\langle f, BW \rangle} N(f) df \quad (12)$$

이 된다. 부모 노드에서 신호 대 잡음 전력비(Signal to Noise Ratio: SNR)는 수신 전력의 크기 S 를 내부 간섭(I_{intra})과 외부 간섭(I_{inter}), 그리고 주변 소음의 크기(N)의 합으로 나눈 값이 되며, 여기에서 주변 소음의 크기와 내부 간섭, 외부 간섭의 크기를 모두 더한 값을 잡음이라 한다. 따라서 그림 3의 $(k-1)$ 번째 계층에 있는 노드 j 에서 비트 에너지 대 잡음 밀도 $(E_b/N_0)_{k-1}$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다^[4].

$$\begin{aligned} (E_b/N_0)_{k-1} &= \frac{S/R_k}{[N + I_{intra} + I_{inter}]/BW} \\ &= \frac{S \times BW}{\int_{\langle f, BW \rangle} N(f) df + S[n(j) - 1] + \sum_{m \in F^{out}(j)} S_{j-m}^{out}} \times R_k \end{aligned} \quad (13)$$

여기에서 E_b 는 비트 에너지, N_0 는 잡음 스펙트럼 밀도, R_k 는 k 번째 계층과 $(k-1)$ 번째 계층 사이의 데이터 전송률을 나타낸다. 따라서 R_k 는 수식 (13)을 정리해서 구할 수 있다.

$$R_k = \frac{S \times BW}{(E_b/N_0)_{k-1} \left[\int_{\langle f, BW \rangle} N(f) df + S[n(j) - 1] + \sum_{m \in F^{out}(j)} S_{j-m}^{out} \right]} \quad (14)$$

2.3 수치해석 및 결과 분석

본 논문은 성능 분석을 위해 싱크 노드와 각 부모 노드가 2개의 자식 노드를 가지는 4계층의 이진 트리 구조를 고려한다. 따라서 그림 4에서 나타낸 것과 같이 첫 번째 계층의 싱크 노드에서부터 네 번째 계층까지 각각 1, 2, 4, 8개의 노드가 존재한다. 또한 주파수 대역을 5kHz에서 100kHz까지 대역폭 10kHz 단위로 나누어 해당 주파수 대역에서의 계층별 데이터 전송률을 분석한다. 본 논문에서 부모 노드에서의 수신 전력 S 는 부모 노드가 속한 계층과 무관하게 주변 소음의 크기보다 5dB 높도록 결정되며, 이를 토대로 자식 노드들은 부모 노드와의 거리를 고려하여 자신의 송신 전력을 계산하고 이 값을 고정적으로 사용한다고 가정한다. 특별한 언급이 없는 경우, 사용된 파라미터

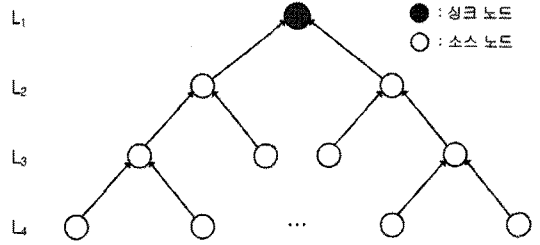


그림 4. 성능 분석을 위한 트리 구조

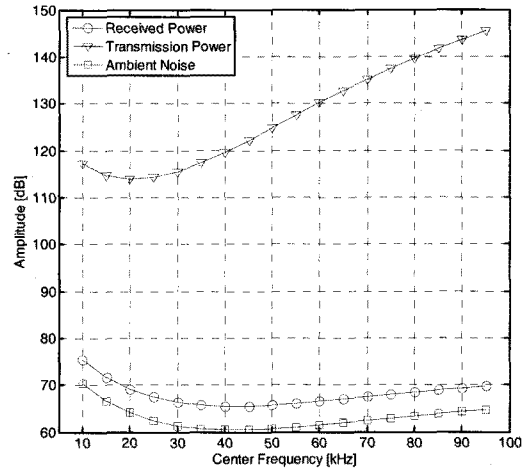


그림 5. 수신 전력 크기에 대한 송신 전력의 크기

는 표 1과 같다.

그림 5는 주변 소음의 크기에 따른 부모 노드에서의 수신 전력과 그에 대응하는 자식 노드의 송신 전력을 나타낸다. 모든 부모 노드는 계층과는 무관하게 자식 노드로부터 동일한 전력을 수신한다. 그림의 x축은 각 중심 주파수를 나타내고, 주파수 대역은 중심 주파수로부터 -5kHz, +5kHz 대역이다. 그림에서 볼 수 있듯이 주변 소음은 주파수 대역에 따라 그 크기가 달라지며 수신 전력은 주변 소음보다 5dB 높도록 전력 제어 된다. 이때 중심 주파수가 10kHz ~ 20kHz인 대역을 제외한 나머지 대역에서 중심 주파수가 커짐에 따

표 1. 수치해석 파라미터

파라미터	값
입력 토폴로지	[1 2 4 8]
동일 계층 내 인접 노드 간 거리	200m
부모-자식 노드간 거리	1km
확산 계수(k)	1.5(practical spreading)
신호 대 잡음비(E_b/N_0)	5dB

라 요구되는 송신 전력의 크기가 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 주파수의 증가에 따라 감쇠의 크기가 커지기 때문에 일정한 수신 전력을 얻기 위해 더 큰 송신 전력이 요구되기 때문이다. 중심 주파수가 10kHz ~ 20kHz 인 대역에서 송신 전력이 감소하는 이유는 해당 대역에서 주변 소음의 크기가 감소하여 요구되는 수신 전력의 크기가 감소하기 때문이다. 반면 중심 주파수가 20kHz ~ 40kHz인 대역에서 수신 전력 크기의 감소에도 불구하고 송신 전력이 증가하는 것은 해당 주파수 대역에서 감쇠의 크기가 주변 소음의 크기의 감소량보다 더욱 크게 증가하기 때문이다.

그림 6은 부모 노드와 자식 노드 사이의 거리에 따라 요구되는 송신 전력의 크기를 나타낸 그림이다. 두 노드 사이의 거리는 각각 1km, 2km, 3km, 5km가 되도록 설정했다. 노드 사이의 거리가 커질수록 감쇠의 크기가 커지므로 동일한 주파수 대역에서 요구되는 송신 전력의 크기는 커지게 된다. 또한 수중에서의 감쇠는 두 노드 사이의 거리보다 주파수 대역에 더 큰 영향을 받기 때문에 낮은 주파수 대역에서는 송신 전력 크기의 차이가 작은 반면, 높은 주파수 대역으로 갈수록 송신 전력 크기의 차이가 큰 폭으로 증가함을 확인할 수 있다.

그림 7은 계층별 데이터 전송률을 나타낸다. R_4 에서 R_2 로 갈수록, 즉 하위계층에서 상위 계층으로 갈수록 데이터 전송률이 높아지는 것은 4계층의 이진 트리 구조를 가정하였기 때문에 상위 계층일수록 인접 가족의 수가 줄어들어 외부 간섭의 크기가 작아지기 때문이다. 또한 R_2 를 제외한 데이터 전송률이 동

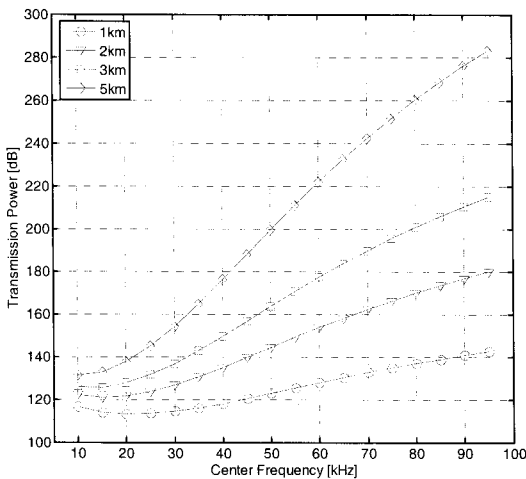


그림 6. 부모 노드와 자식 노드간 거리에 따른 송신 전력의 크기

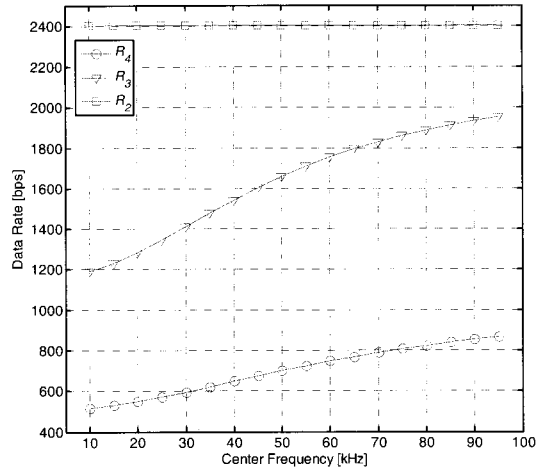


그림 7. 계층별 데이터 전송률

일 계층에서도 주파수가 증가함에 따라 증가하는 것은 높은 주파수 대역에서는 신호 감쇠가 빠르게 증가하여 상대적으로 외부 간섭의 크기가 매우 작아지기 때문이다. R_2 의 경우 싱크 노드와 두 자식 노드 간의 단일 가족만이 고려되며, 따라서 외부 간섭은 존재하지 않는다. 또한 고려하는 모든 주파수 대역에서 수신 전력의 크기 S 에 비해 주변 소음의 크기 N 이 아주 작기 때문에 수식 (14)에서 N 을 무시할 수 있게 된다. 따라서 R_2 는 수식 (14)를 적용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_2 = \frac{S \cdot BW}{(E_b/N_0)_1 [S(n(j)-1)]} = \frac{BW}{(E_b/N_0)_1} \quad (15)$$

따라서 R_2 는 주파수 대역과 무관하게 동일한 데이터 전송률을 가지게 된다.

그림 8은 싱크 노드를 부모 노드로 가지는 자식 노드의 개수에 따른 데이터 전송률에 대한 그림이다. 여기에서는 하나의 싱크 노드와 그 자식 노드 사이의 2계층만을 고려하며 따라서 이웃 가족이 존재하지 않는 단일 가족을 가정한다. 따라서 데이터 전송률에 영향을 미치는 간섭 성분은 외부 간섭을 제외한 주변 소음과 내부 간섭이 된다. 본 논문에서 고려하는 매체 접속 방식에서는 부모 노드에게 데이터를 전송하는 자식 노드를 제외한 나머지 자식 노드의 신호는 내부 간섭으로 작용하므로 자식 노드의 수가 증가할수록 간섭의 크기 또한 증가하게 된다. 따라서 자식 노드의 수가 증가할수록 데이터 전송률은 큰 폭으로 감소하게 된다.

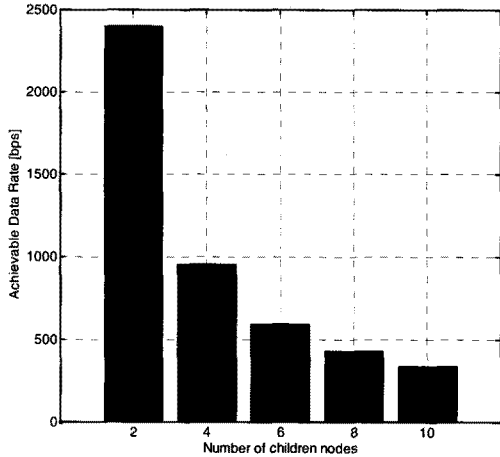


그림 8. 자식 노드의 개수 변화에 따른 싱크 노드에서의 데이터 전송률

그림 9는 그림 8에서 고려한 구조에서 싱크 노드가 자신의 모든 자식 노드로부터 1초 동안 수신할 수 있는 데이터 비트의 수를 나타낸 그림이다. 본 논문에서 고려한 구조에서는 자식 노드의 수가 많을수록 각 자식 노드의 데이터 전송률이 큰 폭으로 감소하므로 싱크 노드가 수신할 수 있는 전체 데이터 비트 수는 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 하지만 싱크 노드가 가지는 자식 노드의 수가 6개 이상일 때는 자식 노드의 수와 무관하게 싱크 노드에서의 수신 데이터량의 차이가 작아지는 것을 확인할 수 있다. 이는 자식 노드의 수가 증가함에 따라 감소하는 데이터 전송률의 크기는 줄어드는데 비해 데이터를 전송하는 자식 노드의 수는 일정하게 증가하기 때문이다.

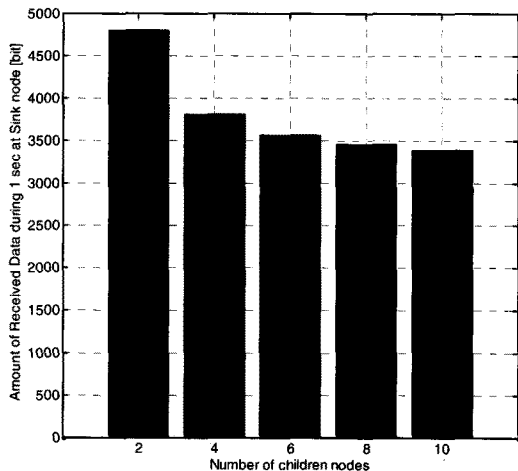


그림 9. 자식 노드의 개수 변화에 따른 싱크 노드에서 1초 동안 수신할 수 있는 데이터 양

III. 결론

본 논문에서는 수중 센서 망에서 코드분할 다중접속 방식의 적용 타당성을 검토하기 위해서 데이터 수집형 트리 구조를 가정하고 엇갈림 깨어남 패턴을 사용한 경우에 대한 성능을 해석하였다. 성능 지표로서, 트리 구조의 각 계층별 데이터 전송률과 수신 노드에서의 일정 신호대 잡음비를 만족하기 위한 송신 전력을 사용하였으며 이를 수학적 해석을 통해 도출하였다.

추후 연구 과제로서, 수신 노드에서의 신호 대 간섭비를 기준으로 전력제어 하는 경우, 송신전력과 데이터 전송률에 대한 수학적 해석과 각 노드별 다중 직교 코드 사용하는 경우에 대한 성능분석이 요구된다.

참고문헌

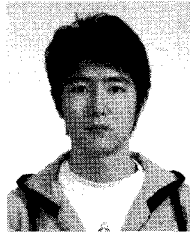
- [1] I.F. Akyildiz, D. Pompili, and T. Melodia, "Underwater Acoustic Sensor Networks: Research Challenges," *Ad Hoc Networks (Elsevier)*, Vol.3, No.3, pp.257-279, May 2005.
- [2] J.-P. Kim, J.-W. Lee, Y.-S. Jang, K. Son, and Ho-Shim Cho, "A CDMA-Based MAC Protocol in Tree-Topology for Underwater Acoustic Sensor Networks," in *Proc. IEEE WAINA*, pp.1166-1171, May 2009.
- [3] J. G. Proakis, E. Sozer, J. Rice, and M. Stojanovic, "Shallow Water Acoustic networks," *IEEE Commun. Mag.*, Vol.39, No. 11, pp.114-119, Nov. 2001.
- [4] J. G. Proakis, *Encyclopedia of Telecommunications-Acoustic (Underwater) Communications*, Wiley, 2003.
- [5] I. F. Akyildiz, D. Pompili, and T. Melodia, "State-of-the-art in Protocol Research for Underwater Acoustic Sensor Networks," in *Proc. WUWNet '06*, Sept. 2006.
- [6] I. F. Akyildiz, D. Pompili, and T. Melodia, "A CDMA-based Medium Access Control for Underwater Acoustic Sensor Networks," *Wireless Communications*, Vol.8, No.4, pp.1899-1909, Apr. 2009.
- [7] G. Lu, B. Krishnamachari, and C. S. Raghavendra, "An Adaptive Energy-Efficient and Low-Latency MAC for Data Gathering in Wireless Sensor Networks," in *Proc. of 18th*

International Parallel and Distributed Processing Symposium, p.224, Apr. 2004.

- [8] L. Krishnamachari, D. Estrin, and S. Wicker, "The impact of data aggregation in wireless sensor networks," in *Proc. of 22nd International Conference on Distributed Computing Systems Workshops*, pp.575-578, Jul. 2002.
- [9] A. A. Syed and J. Heidemann "Time Synchronization for High Latency Acoustic Networks," in *Proc. of INFOCOM 2006*, pp. 1-12, Apr. 2006.
- [10] C Tian, W. Liu, J. Jin, J. W, and Y. Mo, *Localization and Synchronization for 3D Underwater Acoustic Sensor Networks*, SpringerBerlin/ Heidelberg, pp.662-631, 2007.
- [11] N. Chirdchoo, Wee-Seng Soh, and K. C. Chua, "MU-Sync: A Time Synchronization Protocol for Underwater Mobile Networks," in *Proc. of WUWNET 2008*, pp.35-42, Sep. 2008.
- [12] L. Berkhovskikh and Y. Lysanov, *Fundamentals of Ocean Acoustic*, Springer, 1982.
- [13] R. Coates, *Underwater Acoustic Systems*, Wiley, 1989.
- [14] K. S. Gilhousen, I. M. Jacobs, R. Padovani, A. J. viterbi, L. A. Weaver, Jr., and C. E. Wheatley, III, "On the capacity of a cellular CDMA system," *IEEE Transaction on Vehicular Technology*, Vol.40, No.2, pp.303-312, May 1991.

서보민 (Bomin Seo)

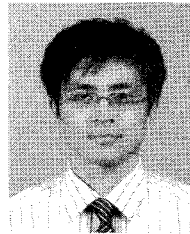
준회원



2009년 2월 경북대학교 전자
전기컴퓨터학부 공학사
2009년 3월~현재 경북대학교
대학원 전자전기컴퓨터학부
석사과정
<관심분야> 이동통신시스템, 수
중음향센서네트워크

조호신 (Ho-Shin Cho)

중신회원



1992년 2월 한국과학기술원 전
기 및 전자공학과 공학사
1994년 2월 한국과학기술원 전
기 및 전자공학과 공학석사
1999년 2월 한국과학기술원 전
기 및 전자공학과 공학박사
1999년 3월~2001년 2월 한국
전자통신연구원 선임연구원
2001년 3월~2003년 2월 한국항공대학교 전자정보
통신컴퓨터공학부 전임강사
2003년 3월~현재 경북대학교 전자전기컴퓨터학부
부교수
<관심분야> 이동통신시스템, 무선자원관리, 트래픽
제어, 수중음향센서네트워크