

지연 허용적인 수중 센서 네트워크에서 노드 그룹핑을 이용한 매체 접속 제어 프로토콜

준회원 천진용*, 정회원 손권**, 종신회원 장윤선***, 조호신****°

A Node-Grouping MAC Protocol in Delay-Tolerant Underwater Acoustic Sensor Networks

Jinyong Cheon* *Associate Member*, Kweon Son** *Regular Member*,
Youn-seon Jang***, Ho-Shin Cho****° *Lifelong Members*

요약

본 논문에서는 수중환경에서의 거리에 따른 전파 손실 특성을 이용한 직교 주파수 분할 다중 접속 방식 (Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA) 기반의 새로운 에너지 효율적인 매체 접속 제어 (Medium Access Control, MAC) 프로토콜을 제안한다. 제안하는 방식은 센서 노드들을 싱크 노드를 중심으로 싱크 노드와의 거리에 따라 그룹을 나눈 후, 그룹에 서로 다른 주파수 대역을 각각 할당하여 사용하도록 한다. 이러한 방식으로 네트워크 전체의 전송 전력 소모를 줄이고 각 센서 노드에게 최소 허용 신호 대 잡음비 (Accepted Minimum SNR, AMS)를 보장한다. 추가적으로 싱크 노드는 동적인 부채널 할당 (dynamic sub-channel allocation)으로 데이터 전송률을 향상한다. 모의실험을 통해 제안하는 매체 접속 제어 프로토콜의 수중 센서 네트워크에서의 성능을 확인할 수 있었다.

Key Words : OFDMA, UWASNs (Underwater Acoustic Sensor Networks), MAC

ABSTRACT

In this paper, we propose a novel energy efficient MAC protocol which is based on orthogonal frequency division multiple access (OFDMA) and exploits the physical characteristic that propagation loss of acoustic wave depends on the distance. In the proposed scheme, sensor nodes are grouped according to the distance to sink node. Then, each group uses a different frequency band. The proposed scheme not only enables all sensor nodes to maintain the signal-to-noise ratio above a certain required level (Accepted Minimum SNR, AMS), but also reduces overall transmission power consumption. In addition, the dynamic sub-channel allocation is employed in order to improve data transmission rate. Simulations show that proposed MAC protocol has better performance in a delay-tolerant underwater acoustic sensor networks.

I. 서론

최근 해양 산업의 발달로 인해 해양 자원 조사, 해

양 환경 탐지, 군사적 목적의 해양 감시 등에 필요한 수중 센서 네트워크에 대한 관심이 급격히 증대되고 있다. 지상 환경에서의 무선 통신은 대개 무선 주파수

※ 본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었으며, 이에 대해 깊이 감사를 드립니다.(계약번호 UD10002KD)

* 경북대학교 대학원 전자전기컴퓨터학부 (jycheon@ee.knu.ac.kr), ** 국방과학연구소 (sk142298@add.re.kr)

*** 충남대학교 전자전파정보통신공학과 (jangys@cnu.ac.kr), **** 경북대학교 IT대학 전자공학부 (hscho@ee.knu.ac.kr), (°:교신저자)

논문번호 : KICS2011-02-094, 접수일자 : 2011년 2월 7일, 최종논문접수일자 : 2011년 10월 12일

(Radio Frequency, RF)를 이용한다. 지상에서의 RF를 이용한 무선 통신의 수중 적용은 물이라는 지상과 다른 통신 매질로 인해 RF의 감쇠현상, 전파의 산란 등으로 부적합하다. 따라서 수중 환경에서는 센서 네트워크 내 통신을 위해 음파 (sound wave)를 이용한다. 하지만 음파 사용에 따른 높은 비트 에러율 (Bit Error Rate, BER), 전파 지연 시간 (propagation delay time), 낮은 전송 대역폭 (bandwidth) 등으로 인하여 통신 노드들 사이의 송수신 전력의 증가 문제가 발생한다. 이를 해결하기 위해 에너지 효율적인 매체 접속 제어 (Medium Access Control, MAC) 프로토콜 설계가 절실히 필요하다.

현재까지 에너지 효율적인 MAC 프로토콜에 대한 많은 연구가 진행되었다¹⁻⁴⁾. [1]에서는 예약 기반의 MAC 프로토콜을 제안하였다. 유휴 상태 (idle state)에서 낭비되는 에너지를 줄이도록 슬립 모드 (sleep mode)를 적용하였으며 중앙 제어 스케줄링 (centralized scheduling)과 동기화가 필요 없는 것이 특징이다. [2]에서는 수중에서의 긴 전파 지연 시간으로 인한 시공간 불확실성 문제를 해결하는 동시에 에너지 소모를 줄이고 전송률을 향상시키기 위한 시분할 다중 접속 방식 (Time Division Multiple Access, TDMA) 기반의 스케줄링 MAC 프로토콜을 제안하였다. [3]에서는 스케줄링 기반의 MAC 프로토콜과 랜덤 액세스 MAC 프로토콜의 장점을 결합한 에너지 효율적인 비동기식 스케줄 기반 MAC 프로토콜을 제안하였다. 예약을 위한 구간과 슬립 구간을 뒹으로써 에너지 소모를 줄였고 계층 교차적 (cross-layer) 관점으로 물리계층에서 길쌈 부호화 (convolution coding)와 인터리빙 (interleaving)을 적용함으로써 수신단에서의 수신율을 향상시켰다. [4]에서는 다중 경로와 도플러 효과가 심한 수중환경에 적합한 부호 분할 다중 접속 방식 (Code Division Multiple Access, CDMA)을 활용한 MAC 프로토콜을 제안하였다. 클러스터 내부는 CDMA를 활용하여 통신하고 클러스터 헤더와 기지국은 TDMA 스케줄에 의해 통신한다. UW-MAC은 지연 시간 (latency)을 줄이고 전송률을 높이며 네트워크 수명의 증가를 목표로 하였다. 이와 같이 대부분의 연구는 슬립 모드, 통신 노드 사이의 주고받기 (handshaking) 기법, 전송 시기 스케줄링 기법 등 주로 논리적 방법으로 접근하였고 드물게 수중 음향 채널의 물리적 특성을 고려하기도 하였다. 계층 교차적 최적화 관점에서 볼 때 지상과 다른 수중 음향 채널의 물리적 특성은 센서 노드의 에너지 소모를 줄이는데 활용할 수 있는 가능성이 무수히 존재한다.

본 논문은 수중에서의 주파수와 거리에 따른 음파 전파 손실 (propagation loss)을 활용한 직교 주파수 다중 접속 방식 (Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA) 기반의 센서 노드 그룹핑 MAC 프로토콜인 NOGO-MAC (NOde Grouped OFdma MAC)을 제안한다. 제안하는 MAC 프로토콜은 통신 거리와 주파수에 의존적인 전파 손실 특성을 활용하여 싱크 노드로부터 각 센서 노드까지의 거리에 따라 센서 노드를 그룹화한다⁵⁾. 그리고 각 센서 노드 그룹은 싱크 노드와 통신 시 해당 그룹에 할당된 부대역 (sub-band)을 사용한다. 즉, 싱크 노드와 거리가 가까운 그룹은 감쇠가 심한 고주파 부대역을, 거리가 먼 그룹은 감쇠가 적은 저주파 부대역을 할당받아 사용한다. 추가적으로, 동적인 OFDMA 부채널 할당 (dynamic OFDMA sub-channel allocation)은 전송률을 향상시킨다. 모의실험을 통해 그룹화를 하지 않고 통신하는 방식보다 제안하는 방식이 시스템 전체 대역폭의 변화에 따라 센서 노드의 평균 전송 전력량이 최소 약 2 dB에서 최대 약 7 dB까지 감소함을 확인하였다. 그리고 OFDMA 부채널 할당으로 향상된 전송률 또한 확인할 수 있었다.

본 논문은 다음과 같은 구성을 가진다. 2장에서 본 논문에서 고려하는 시스템 모델에 대해 설명하고 3장에서 NOGO-MAC의 동작에 대한 소개 후 4장에서 모의실험 환경과 결과에 대해 설명한다. 마지막으로 5장에서는 4장의 모의실험 결과를 바탕으로 결론을 맺도록 한다.

II. 시스템 모델

2.1 네트워크 토폴로지

본 논문에서는 그림 1 과 같이 싱크 노드가 중앙에 위치하고 싱크 노드의 통신 반경 내 센서 노드가 균등 임의 분포 (uniform randomly deploy)하고 있는 3차원 네트워크를 가정한다. 그리고 모든 노드는 동일한 원형의 통신 반경을 가진다. 센서 노드들은 수온, 수압, 염도 등의 주위 환경 정보나 주위의 상황 정보를 수집하여 싱크 노드로 전송한다. 이 때, 모든 센서 노드들은 싱크 노드의 통신 반경 내에 존재하므로 수집한 정보를 라우팅 없이 직접적으로 싱크 노드로 전송한다. 그리고 각 센서 노드는 식별을 위한 고유한 ID (identification number)를 가지고 있으며 서로 동기화되어 있다고 가정한다. 노드의 움직임으로 인한 거리 오차는 통신 반경과 비교할 때 미미하므로 본 논문에서는 고려하지 않는다.

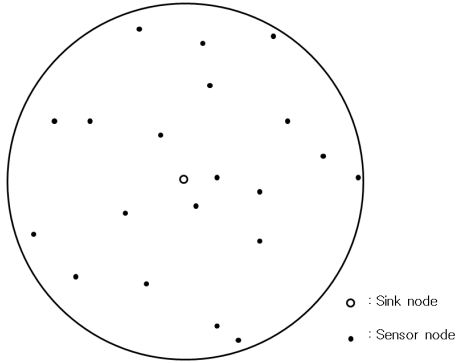


그림 1. 네트워크 토폴로지
Fig. 1. Network topology

2.2 수중 채널 모델

수중 환경에서 신호의 감쇠는 주로 통신 주파수와 전송 거리에 영향을 받으며 본 논문에서는 수중 채널 모델로 Urick 감쇠 모델을 고려한다⁶⁾.

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

여기서 l 은 전송 거리, f 는 사용 통신 주파수, 그리고 k 는 확산 계수를 뜻한다. 확산 계수는 1에서 2의 값을 가진다. 흡음지수 $a(f)$ 는 다음의 식으로 표현된다. $a(f)$ 의 단위는 dB/km 이다.

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

수중에서의 잡음 요소로는 바람, 선박, 파도, 열이 주로 고려된다. 각 요소에 대한 잡음 값은 다음의 식으로 표현되며 잡음 값의 단위는 $dB \text{ re Pa}$ 이다.

$$10\log N_{\text{바람}}(f) = 17 - 30\log f \tag{3}$$

$$10\log N_{\text{선박}}(f) = 40 + 20(s - 0.5) + 25\log f - 50\log(f + 0.03) \tag{4}$$

$$10\log N_{\text{파도}}(f) = 50 + 7.5w^{1/2} + 20\log f - 40\log(f + 0.4) \tag{5}$$

$$10\log N_{\text{열}}(f) = -15 + 20\log f \tag{6}$$

따라서 수중에서의 전체 주변 소음 $N_{\text{전체}}$ 는 식 (3), (4), (5), (6)의 합으로써 식 (7)과 같다.

$$N_{\text{전체}} = N_{\text{바람}} + N_{\text{선박}} + N_{\text{파도}} + N_{\text{열}} \tag{7}$$

감쇠와 잡음을 고려하여 전송 신호의 전력 스펙트럼 밀도가 P_T 일 때 통신 주파수 f 에 대한 신호 대 잡음비 (Signal to Noise Ratio, SNR)는 식 (8)과 같이 표현된다.

$$SNR(l, f) = \frac{P_T}{A(l, f)N_{\text{전체}}} \tag{8}$$

본 논문에서는 수중에서의 주파수 의존적 (frequency-dependent)인 감쇠와 잡음으로 인한 경로 손실 특성을 이용하여 센서 노드를 그룹화한다. 그림 3은 그룹화 유무에 따른 목표 통신 SNR을 만족하기 위해 추가적으로 요구되는 전력 요구량의 차를 보여준다.

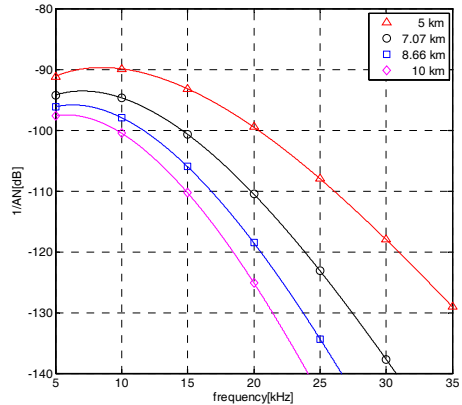


그림 2. 주파수(kHz)와 거리에 따른 신호 대 잡음비(dB)
Fig. 2. SNR according to frequency and distance

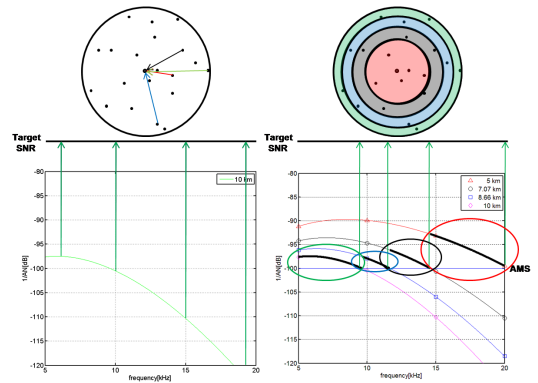


그림 3. 센서 노드의 전력 소모 비교
Fig. 3. A comparison of power consumption of node

III. NOGO-MAC의 동작

NOGO-MAC 프로토콜은 두 가지 동작 단계 즉, 초기화 단계(initialization phase)와 전송 단계(transmission phase)로 동작한다. 초기화 단계에서는 각 센서 노드의 소속 그룹과 그 소속 그룹 내에서의 전송 순번(transmission order)이 결정되고 전송 단계에서는 싱크 노드로 전송할 데이터가 있는 센서 노드의 전송 예약과 센서 노드가 사용할 부채널 할당, 그리고 실제적인 싱크 노드로의 데이터 전송이 이뤄진다.

3.1 초기화 단계

초기화 단계의 두 가지 주된 목적은 다음과 같다. 첫 번째는 센서 노드의 소속 그룹을 결정하는 것이다. 센서 노드들을 싱크 노드로부터의 거리에 따라 그룹화함으로써 저전력 데이터 전송이 가능하도록 한다. 두 번째는 소속 그룹 내에서 각 센서 노드의 전송 순번을 결정하는 것이다. 초기화 단계에서 결정된 전송 순번을 통해 센서 노드들은 TDMA 방식을 이용하여 충돌 없이 전송 예약을 할 수 있다.

그림 4는 초기화 단계에서의 싱크 노드와 센서 노드 간의 메시지 교환을 나타내고 있다. 초기화 단계 시작과 동시에 싱크 노드는 통신 반경 내의 모든 센서 노드들에게 수중 센서 네트워크 구성을 알리기 위해 초기화 메시지(initialization message, m_{init})를 방송(broadcast)한다. 초기화 메시지는 싱크 노드의 방송 시점 타임 스탬프(time stamp) 값을 포함하고 있다.

싱크 노드의 통신 반경 내의 모든 센서 노드들은 초기화 메시지 방송 시점에서 최대 전파 지연 시간(maximum propagation delay) 내에 초기화 메시지 수신을 완료하게 된다. 초기화 메시지를 수신한 각 센

서 노드는 수신 시점 타임 스탬프 값과 자신의 노드 ID를 기록해 참여 메시지(participation message, m_{part})를 싱크 노드로 전송한다. 이 때, 참여 메시지 전송 시 싱크 노드로부터 같은 거리에 존재하는 센서 노드끼리의 참여 메시지 충돌을 방지하기 위해 시스템에서 설정한 경쟁 윈도우(contention window) 내에서 임의의 시간을 선택 후 임의의 시간 지연(random backoff)^[7]하여 전송한다. 그림 4에서 보면 각 센서 노드마다 초기화 메시지를 수신하고 난 뒤 임의의 시간을 지연하여 싱크 노드로 참여 메시지를 전송하는 것을 확인할 수 있다.

따라서 싱크 노드는 통신 반경 내의 모든 센서 노드로부터 참여 메시지를 수신하기 위해서 초기화 메시지 방송 후 $2 \times \tau_{max.prop} + size_{cw}$ 를 대기한다. 여기서 $\tau_{max.prop}$ 는 싱크 노드의 통신 반경 최대 전파 지연 시간이고 $size_{cw}$ 는 경쟁 윈도우의 크기이다.

싱크 노드의 참여 메시지 수집이 끝나면 참여 메시지 내의 각 센서 노드 ID와 타임 스탬프 값을 활용하여 식(9)와 같은 왕복 시간(Round Trip Time, RTT) 계산을 통해 왕복 시간과 각 센서 노드의 싱크 노드로부터의 거리를 구할 수 있다.

$$\frac{(t_{sensor1} - t_{sink1}) + (t_{sink2} - t_{sensor2})}{2} \quad (9)$$

여기서 t_{sink1} 은 싱크 노드의 초기화 메시지 방송 시점 타임 스탬프 값, t_{sink2} 는 싱크 노드에서의 각 센서 노드의 참여 메시지 수신 시점의 타임 스탬프 값, $t_{sensor1}$ 은 센서 노드에서의 초기화 메시지 수신 시점 타임 스탬프 값, 그리고 $t_{sensor2}$ 는 센서 노드에서의 참여 메시지 전송 시점의 타임 스탬프 값이다.

싱크 노드는 RTT 계산을 통해 얻은 각 센서 노드의 싱크 노드로부터의 거리 정보를 바탕으로 센서 노드를 그룹화한다. 그리고 각 그룹 별로 RTT 값의 오름차순으로 정렬하여 차례대로 동일 부대역을 공유하게 될 센서 노드들 간의 전송 순번을 결정한다. RTT 값의 오름차순으로 정렬하여 전송 순번을 할당하는 이유는 이후 전송 단계에서 싱크 노드가 연속적으로 센서 노드들의 전송 예약 패킷을 수신하기 위함이다. 각 센서 노드의 소속 그룹과 전송 순번 할당이 완료되면 싱크 노드는 이 정보를 할당 메시지(allocation message, m_{alloc})에 포함하여 참여 메시지를 전송한 모든 센서 노드가 자신의 소속 그룹과 전송 순번 그리고 각 그룹의 최대 전파 지연 시간을 알 수 있도록 방

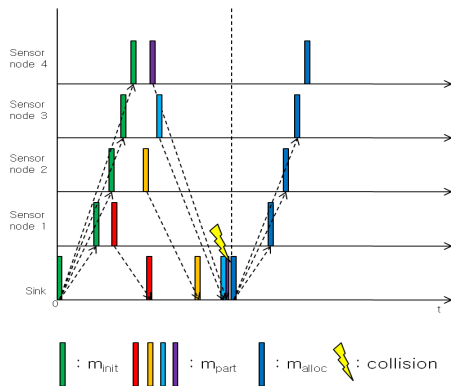


그림 4. 초기화 단계에서의 메시지 교환
Fig. 4. Messages exchange in initialization phase

송한다. 여기서 각 그룹의 최대 전파 지연 시간은 싱크 노드에서 각 그룹 최외각 경계까지의 전파 지연 시간을 뜻한다.

참여 메시지 충돌로 인해 금번 초기화 단계에 참여하지 못한 센서 노드나 새로 뿌려진 센서 노드의 경우에도 추후에 수중 센서 네트워크에 참여할 수 있다. 한 번의 초기화 단계 이후 N 번의 전송 단계를 가지게 되는데 새로 수중 센서 네트워크에 참여하기를 바라는 센서 노드의 경우에는 N 번의 전송 단계 후 추가적인 초기화 단계를 통해 참여 가능하다.

3.2 전송 단계

그림 5는 전송 단계에서의 싱크 노드와 전송 예약 센서 노드 간의 메시지 교환을 나타내고 있다. 초기화 단계의 종료 이후 N 번의 전송 단계가 반복적으로 진행된다. 전송 단계의 시작과 동시에 싱크 노드는 전송 예약을 요구하는 예약 요구 메시지 (reservation request message, R_{req})를 방송한다. 예약 요구 메시지를 수신한 센서 노드들 중 싱크 노드로 전송할 데이터가 존재하는 노드는 예약 응답 메시지 (reservation response message, R_{res})를 싱크 노드로 전송해 전송 주기 (transmission period)에서 싱크 노드로 데이터 전송을 위한 부채널 할당을 요청한다. 서로 어떠한 정보도 알지 못하는 초기화 단계와 달리 전송 단계에서는 센서 노드의 소속 그룹과 전송 순번이 결정된 상태이므로 예약 응답 메시지 전송 시 초기화 단계와 같이 임의의 시간 지연하지 아니하고 자신에게 할당된 시간 슬롯 (time slot)을 이용하여 TDMA 방식으로 충돌 없이 전송한다. 예약 응답 메시지는 전송한 센서 노드의 그룹과 전송 순번 그리고 불연속적인 수중 부채널 품질을 알려주는 수신 신호 강도 지수 (Received Signal Strength Indicator, RSSI) 정보를 포함한다. 싱

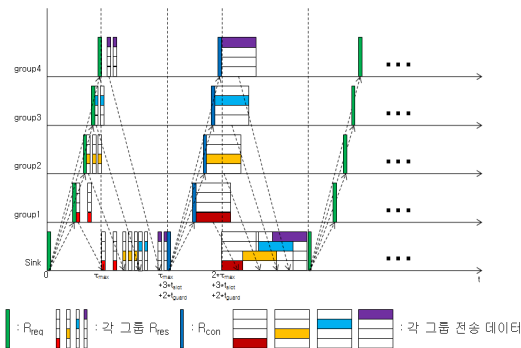


그림 5. 전송 단계에서의 메시지 교환
Fig. 5. Messages exchange in transmission phase

크 노드는 수집한 예약 응답 메시지를 통해 데이터 전송에 참여할 노드의 현황을 파악하고 각 센서 노드가 제공하는 RSSI 정보를 통해 각 센서 노드가 사용하게 될 부채널을 할당한다. 부채널 할당이 완료되면 싱크 노드는 전송 시점 타임 스탬프 값과 할당 정보를 예약 확인 메시지 (reservation confirmation message, R_{con})에 포함하여 방송함으로써 통신 반경 내에 전송 예약한 센서 노드들이 자신의 부채널 할당 정보를 확인할 수 있도록 한다. 예약 확인 메시지를 통해 자신의 부채널 할당 정보를 확인한 센서 노드는 전송 시점 타임 스탬프 값에서 $2 \times \tau_{prop}$ 시점에 데이터가 싱크 노드에 도착할 수 있도록 각자 알맞은 시점에 할당받은 부채널을 이용해 데이터를 전송한다. 이러한 전송 단계는 초기화 단계 종료 후 N 회 반복된다.

3.3 NOGO-MAC의 동작 알고리즘

3.3.1 TDMA를 이용한 전송 예약 알고리즘

그림 6은 전송 단계에서의 TDMA를 이용한 예약 응답 메시지 전송의 예를 나타내고 있다. 초기화 단계에서는 싱크 노드와 센서 노드, 또는 센서 노드와 센서 노드 사이에 서로에 대한 정보가 존재하지 않으므로 싱크 노드로부터 동일한 거리가 떨어진 센서 노드 사이의 참여 메시지 충돌을 줄이고자 임의의 시간 지연하여 전송하였다. 하지만 전송 단계에서는 모든 센서 노드가 자신의 소속 그룹, 그룹 내 전송 순번, 그리고 각 그룹에 관련된 정보를 알고 있다. 따라서 충돌이 완전히 해결되지 못한 임의의 시간 지연하여 전송하는 참여 메시지와 달리 예약 요구 메시지 전송 시점 타임 스탬프 값, 자신의 소속 그룹과 전송 순번을 활용하여 싱크 노드로 전송할 데이터가 존재하는 센서 노드는 식 (10)을 통해 전송 시기를 구한 뒤 자신의 소속 그

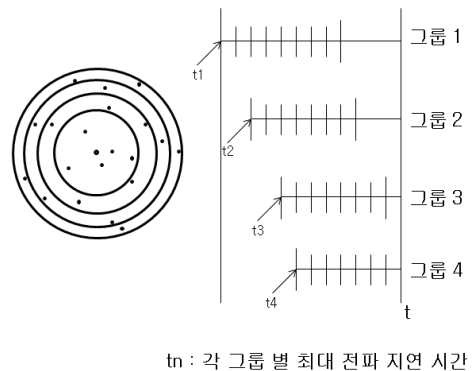


그림 6. TDMA를 이용한 전송 예약
Fig. 6. packet reservation using TDMA

롭이 할당받은 부대역을 이용하여 예약 응답 메시지를 전송한다. 예약 응답 메시지 전송 시 TDMA를 활용함으로써 같은 그룹 내의 센서 노드끼리의 충돌을 방지하고 각 그룹 별로 할당받은 부대역을 이용함으로써 그룹 간 센서 노드끼리의 충돌을 해소한다.

$$t_{request} + \tau_{group,prop} + (n-1) \times (l_{packet} + t_{guard}) \quad (10)$$

여기서 $t_{request}$ 는 싱크 노드의 예약 요구 메시지 전송 시점, $\tau_{group,prop}$ 는 각 그룹의 최대 전파 지연 시간, n 은 그룹 내 자신의 전송 순번, l_{packet} 은 패킷의 길이 (packet length)로 패킷 1개의 전송 처리 시간을 뜻한다. 그리고 t_{guard} 는 보호 시간 (guard time)이다. 보호 시간은 상수로 수중에서의 정확하지 못한 시각 동기로 인한 충돌을 예방한다.

3.3.2 동적인 OFDMA 부채널 할당 알고리즘

싱크 노드는 센서 노드들로부터 수신한 예약 응답 메시지를 이용하여 동적인 OFDMA 부채널 할당을 한다. 부채널 할당 원칙은 식 (11)과 같다.

$$\max \sum_{u=1}^U \sum_{n=1}^N r_{u,n} s_{u,n} \quad (11)$$

여기서 U 는 전체 센서 노드의 수, N 은 전체 부채널의 개수, $r_{u,n}$ 은 센서 노드 u 가 부채널 n 을 사용할 때의 데이터 전송률 (data rate), 그리고 $s_{u,n}$ 는 선택 지시자 (selection indicator)이다 (즉, 부채널 n 이 센서 노드 u 에 할당된 경우 $s_{u,n} = 1$, 부채널 n 이 센서 노드 u 에 할당되지 않은 경우 $s_{u,n} = 0$). 부채널 할당

조건은 아래 세 가지로 주어진다. 첫 번째,

$$\sum_{u=1}^U s_{u,n} = 1, \forall n \in \{1, 2, 3, \dots, N\} \quad (12)$$

두 번째,

$$\sum_{n=1}^N s_{u,n} = 1, \forall u \in \{1, 2, 3, \dots, U\} \quad (13)$$

세 번째는 서비스 품질 (Quality of Service, QoS)의 만족이다. 식 (12)와 식 (13)은 센서 노드와 부채널이 1 대 1 매칭 (One-to-One Matching)됨을 뜻한다.

S.C가 부채널이고 부채널 상태 값은 0 (상태 나쁨) ~ 10 (상태 좋음)으로 볼 때 단순히 센서 노드 순서대로 양호한 부채널을 할당할 경우 그림 7과 같이 할당이 될 것이다⁸⁾. 첫 번째로 센서 노드 1번이 채널 상태가 가장 양호한 부채널 1번을 할당 받는다. 센서 노드와 부채널은 1 대 1 매칭이므로 할당이 완료된 부채널을 제외하고 노드 번호 순서대로 잔여 부채널 중 양호한 부채널을 할당받게 되어 마지막 센서 노드 5번은 비교적 상태가 좋지 않은 부채널 5번을 할당받게 된다. 이렇게 하여 할당이 완료된 부채널의 채널 상태 값의 합을 구해보면 42 (10 + 10 + 9 + 8 + 5)가 된다. 이런 경우를 해결하기 위해 본 논문에서는 부채널 할당 시 주파수와 통신 노드 간 거리에 의존하는 수중 음파 채널에서의 경로 손실 특성을 이용한다.

수중 음파 채널에서의 경로 손실 특성을 보면 대체적으로 두 통신 노드 간 거리가 가까울수록, 통신 주파수가 저주파일수록 양호한 부채널의 개수가 많다. 싱크 노드는 각 센서 노드로부터 수집된 예약 응답 메

Node no.	S.C 1	S.C 2	S.C 3	S.C 4	S.C 5	S.C 6	S.C 7
No.1	10	10	9	8	7	6	4
No.2	10	9	10	9	9	8	7
No.3	10	9	8	7	7	6	4
No.4	10	10	9	8	8	7	6
No.5	10	9	7	5	5	4	3

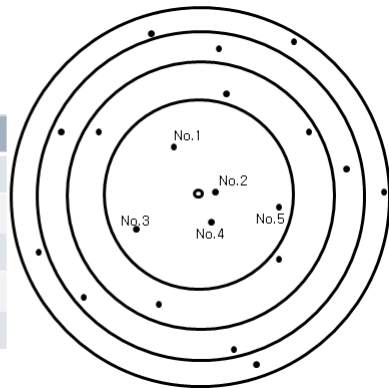


그림 7. 센서 노드 순서대로 부채널을 할당했을 경우
Fig. 7. Sub-channel allocation (by sequence of node number)

Node no.	S.C 1	S.C 2	S.C 3	S.C 4	S.C 5	S.C 6	S.C 7
No.1	10	10	9	8	7	6	4
No.2	10	9	10	9	9	8	7
No.3	10	9	8	7	7	6	4
No.4	10	10	9	8	8	7	6
No.5	10	9	7	5	5	4	3

Node no.	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
Number of S.C	1	0	1	0	4
Mean value	8.3333	8.8571	7.8333	8.2857	8.6666
Order	3	5	2	4	1

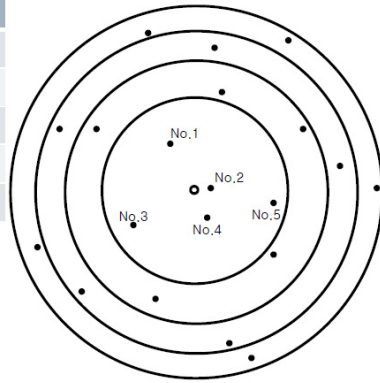


그림 8. 본 논문에서 제안하는 알고리즘으로 부채널을 할당했을 경우 Fig. 8. Sub-channel allocation (by the proposed scheme)

시지를 이용하여 다음의 두 가지 절차로 부채널 할당을 한다. 첫 번째, 설정한 최소 허용 채널 상태보다 낮은 채널 상태 값을 가지는 부채널의 개수가 많은 센서 노드에게 부채널을 우선적으로 할당한다. 두 번째, 최소 허용 채널 상태보다 낮은 채널 상태 값의 부채널 개수가 같을 경우에는 최소 허용 채널 상태보다 높은 채널 상태 값을 가지는 부채널의 채널 상태 값의 평균이 낮은 센서 노드에게 우선적으로 할당한다. 이 두 가지 절차는 전체적으로 양호한 부채널이 적은 센서 노드에게 우선적으로 부채널을 할당하기 위함이다. 따라서 최소 허용 채널 상태 값으로 6을 설정한 뒤 제안하는 방식으로 부채널을 할당할 경우 그림 8과 같이 할당이 될 것이다. 최소 허용 채널 상태 값보다 낮은 부채널이 4개로 가장 많은 센서 노드 5번이 가장 먼저 부채널 1번을 할당 받는다. 최소 허용 채널 상태 값보다 낮은 부채널이 1개로 같은 센서 노드 1번과 3번은 채널 상태 값 평균을 비교하여 평균이 낮은 센서 노드 3번, 그 다음 평균이 높은 센서 노드 1번이 할당을 받는다. 할당이 완료된 부채널의 채널 상태 값의 합을 구해보면 이 전의 42에서 45로 성능이 높아졌음을 확인할 수 있다.

IV. 모의실험 및 결과

본 장에서는 NOGO-MAC 프로토콜의 성능을 컴퓨터 모의실험을 통해 분석한다. 모의실험을 위한 파라미터의 경우 표 1에 정리해 두었다. 각 센서 노드는 포이송 분포에 의해 전송 데이터가 발생하며 각 센서 노드는 버퍼가 존재하여 다수의 전송할 데이터를 저

장할 수 있다고 가정한다.

그림 9는 초기화 단계에서 각 센서 노드들이 임의의 시간 지연 후 참여 메시지를 싱크 노드로 전송할 때 싱크 노드에서의 충돌율을 나타낸다. 센서 노드의 개

표 1. 모의실험 파라미터 Table 1. Parameters of simulations

파라미터	값
시스템 전체 통신 대역폭 (BW)	15, 20, 25, 30, 35 kHz
목표 신호 대 잡음비 (SNR_{target})	20 dB
통신 대역폭의 최저값	5 kHz
싱크 노드의 통신 반경	10 km
보호 시간	100 ms
데이터 패킷 크기	3000 bits

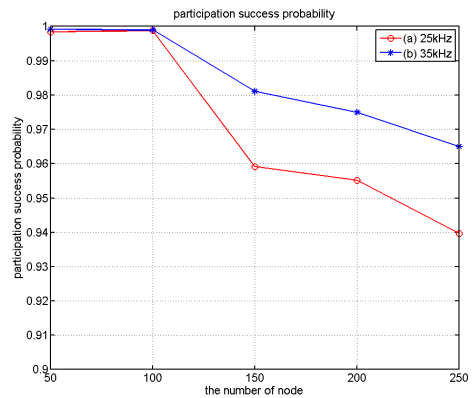


그림 9. 참여 메시지 충돌율 Fig. 9. Collision rate of participation messages

수가 증가함에 따라 시스템 대역폭 25 kHz, 35 kHz 모두 참여 메시지 충돌율이 증가함을 볼 수 있다. 센서 노드의 개수가 100개에서 150개로 증가하면서 시스템 대역폭 25 kHz, 35 kHz 경우 모두 충돌율이 급격하게 증가하며 시스템 대역폭 35 kHz의 경우가 25 kHz의 경우보다 전체적으로 충돌율이 낮다. 이는 시스템 대역폭이 넓을수록 데이터 전송률 (data rate)이 높아 참여 메시지 패킷의 길이가 짧아 충돌율이 낮기 때문이다.

그림 10은 전송 단계에서 싱크 노드로 보낼 데이터가 존재하는 센서 노드의 데이터 전송 예약 시 소요되는 시간을 나타낸다. 여기서 traditional TDMA는 센서 노드의 그룹핑 없이 싱크 노드로부터 거리에 따라 순서대로 시간 슬롯을 할당하여 자신의 시간 슬롯을 사용하여 전송 예약을 하는 방식이다. 그리고 proposed scheme은 본 논문에서 제안하고 있는 전송 예약 방식으로 각 센서 노드 그룹 별로 순번대로 시간 슬롯을 할당하여 자신의 시간 슬롯과 자기 그룹의 할당 부대역을 이용해 전송 예약하는 방식이다. 두 가지 방식 모두 센서 노드의 개수가 증가함에 따라 예약 시 소요되는 시간 역시 증가한다. Traditional TDMA의 경우 센서 노드의 개수가 매우 민감한 경향을 보이나 본 논문에서 제안하고 있는 방식은 각 그룹 별로 예약이 TDMA 방식으로 동시에 병렬로 진행되므로 Traditional TDMA에 비해 센서 노드의 개수 증가에 영향을 덜 받는다.

그림 11은 시스템 대역폭 변화에 따른 센서 노드들의 평균 전송 전력량을 나타낸다. 센서 노드의 평균

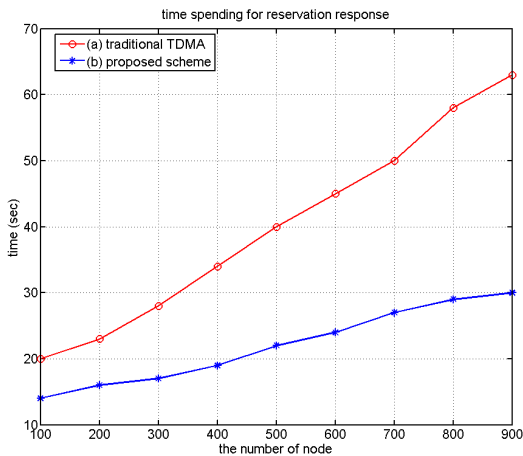


그림 10. 데이터 전송 예약 시 소요되는 시간 (a) 기존의 TDMA (b) 제안하는 기법
Fig. 10. Time consumption for reservation (a) Traditional TDMA (b) Proposed scheme

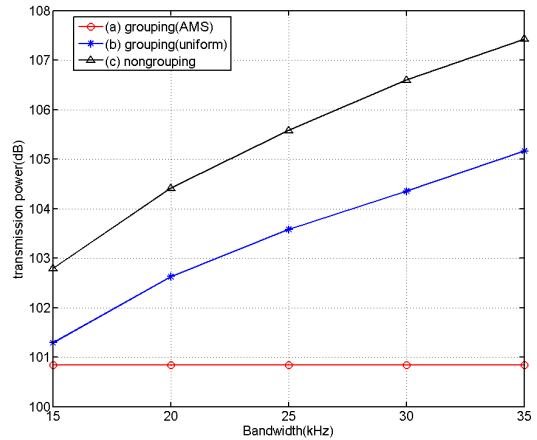


그림 11. 시스템 대역폭의 변화에 따른 센서 노드들의 평균 전송 전력량 (a) AMS를 적용하여 각 그룹에 부대역을 할당 하였을 때 (b) 단순히 시스템 대역폭을 동일하게 각 그룹에 부대역을 할당하였을 때 (c) 그룹핑하지 않았을 때
Fig. 11. Power consumption alteration via overall bandwidth (a) Grouping (with AMS) (b) Grouping (uniform) (c) Nongrouping

전송 전력량은 식 (14)을 통해 구했다⁹⁾.

$$P = BW \times SNR_{target} \times \frac{\int_{BW} M(f)df}{\int_{BW} A^{-1}(l, f)df} \quad (14)$$

그림 11(a)는 그림 3과 같이 AMS를 적용하여 각 그룹에 부대역을 할당한 경우이고, 그림 11(b)는 단순히 시스템 대역폭을 그룹 수대로 동일하게 나눠 각 그룹에 부대역으로 할당하는 방식이다. 그리고 그림 11(c)는 그룹핑을 하지 않았을 때를 나타낸다. 우선 (a), (b) 와 (c)를 비교해 보면 그룹핑을 하여 시스템 대역폭을 그룹에 할당하여 사용하는 것이 그룹핑을 하지 않는 것보다 평균 전송 전력이 적은 것을 알 수 있다. 그리고 (a)와 (b)를 비교하면 단순히 시스템 대역폭을 그룹 수대로 동일하게 나눠주는 것보다 AMS를 적용하여 각 그룹에 부대역을 할당한 경우가 센서 노드의 평균 전송 전력이 적은 것을 알 수 있다. 그림 11에서 보듯이 센서 노드를 그룹화하여 AMS를 적용하여 각 그룹에 부대역을 할당해 사용한다면 평균 전송 전력량 증가 없이 좀 더 광대역의 통신 대역폭을 사용할 수 있다.

그림 12는 λ값의 변화에 따른 데이터 전송률의 변화를 나타낸다. λ는 포아송 분포에 의해 전송 데이터가 발생하는 환경에서 단위시간 당 생성 패킷을 뜻한다. (a)와 (b)는 각각 시스템 대역폭을 동일하게 나눠

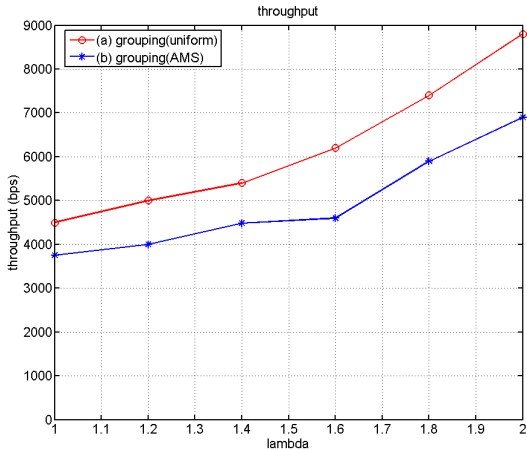


그림 12. λ 값의 변화에 따른 데이터 전송률의 변화 (a) 시스템 대역폭을 동일하게 나눠 각 그룹에 부대역으로 할당하였을 때 (b) AMS를 적용하여 각 그룹에 부대역을 할당하였을 때

Fig. 12. Throughput alteration via λ (a) Grouping (uniform) (b) Grouping (with AMS)

각 그룹에 부대역으로 할당하였을 때와 AMS를 적용하여 각 그룹에 부대역을 할당하였을 때를 나타낸다. (a)와 (b) 두 경우 모두 단위 시간 당 평균 생성 패킷 수인 λ 가 증가함에 따라 전송률 또한 증가함을 보여준다. 그림 11에서 보았듯이 시스템 대역폭을 동일하게 나눠 각 그룹에 부대역으로 할당하였을 경우 센서 노드의 평균 전송 전력 특성은 AMS 적용한 경우에 비해 나쁘더라도 전송률에서는 약간의 이득이 있음을 보인다. 이는 AMS를 적용하면 각 그룹이 불균등하게 부대역을 할당받는데 비해 각 그룹에 시스템 대역폭을 동일하게 나눠 줄 경우 각 그룹이 할당받은 부대역이 크기가 동일하여 각 그룹간의 평등성이 증가하기 때문이다. 따라서 부대역을 균등하게 할당할 것인가 또는 AMS를 적용하여 할당할 것인가 하는 것은 전송률과 평균 전송 전력의 trade-off 관계에 있다.

V. 결론

본 논문에서는 수중 센서 네트워크 환경에서 싱크 노드와 센서 노드의 송수신 거리가 증가함에 따라 전송전력이 증가하는 문제를 해결하고 센서 노드 간의 데이터 충돌로 인한 데이터 패킷 손실을 줄여 전송률을 높인 OFDMA 기반의 센서 노드 그룹핑 MAC 프로토콜을 제안하였다. 그리고 모의실험을 통해 전체 시스템 대역폭의 변화에 따른 센서 노드의 평균 전송 전력량의 변화와 본 논문에서 제안하고 있는 프로토콜의 데이터 전송률 등의 성능을 분석해 보았다. 이를

통해 센서 노드를 싱크 노드로부터의 거리에 따라 그룹화를 할 때 그렇지 않은 경우보다 센서 노드의 평균 전송 전력량이 줄어듦을 확인할 수 있었다. 그리고 데이터 전송률 측면에서 TDMA를 이용하여 데이터 전송을 예약한 뒤 싱크 노드로부터 OFDMA 부채널을 할당받아 데이터를 전송함으로써 이에 따른 전송률의 향상을 확인할 수 있었다. 따라서 본 논문에서 제안하고 있는 MAC 프로토콜은 해양 산업의 저전력 수중 센서 네트워크 구성에 활용될 수 있을 것이라고 본다.

참고 문헌

- [1] Peng Xie, and Jun-Hong Cui, "R-MAC: An Energy-Efficient MAC Protocol for Underwater Sensor Networks," in *Proc. International Conference on Wireless Algorithm, Systems, and Applications (WASA '07)*, 2007
- [2] Chih-Cheng Hsu, Kuang-Fu Lai, Cheng-Fu Chou, and Kate Ching-Ju Lin, "ST-MAC: Spatial-Temporal MAC Scheduling for Underwater Sensor Networks," in *Proc. INFOCOM*, pp.1827-1835, 2009.
- [3] Qingchun Ren, and Xiuzhen Cheng, "Latency-Optimized and Energy-Efficient MAC Protocol for Underwater Acoustic Sensor Networks: A Cross-Layer Approach," *EURASIP J. Wireless Comm. and Networking*, 2010.
- [4] Mohamed K. Watfa, Samir Selman, and Hovig Denkilian, "UW-MAC: An underwater sensor network MAC protocol," *Int. J. Communication Systems*, 23(4), pp.485-506, 2010.
- [5] 황성호, 조호신, "수중 센서 네트워크에서 노드 그룹화를 통한 전송전력 절약 방안," *한국음향학회지*, 제28권, 제8호, 2009.
- [6] R. Urick, *Principles of Underwater Sound*, McGraw-Hill, 1983.
- [7] Holger Karl, Andreas Willig, *Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks*, Willy, 2005.
- [8] 박정식, 조호신, "OFDMA 시스템에서 실시간 트래픽 전송을 위한 효율적 스케줄링 기법," *한국통신학회논문지*, 제32권, 제1호(무선통신), 2007.
- [9] M. Stojanovic, "On the relationship between capacity and distance in an underwater acoustic communication channel," in *Proc. ACM*

WUWNet, pp. 41-47, Sept 2006.

천 진 용 (Jinyong Cheon)

준회원



2009년 2월 경북대학교 전자전
기컴퓨터학부 공학사
2011년 8월 경북대학교 전자전
기컴퓨터학부 공학석사
2011년 9월~현재 경북대학교
전자전기컴퓨터학부 박사과정

<관심분야> 이동통신시스템, 수중음향센서네트워크

장 윤 선 (Youn-seon Jang)

종신회원



1992년 2월 경북대학교 전자공
학과 공학사
1994년 2월 한국과학기술원 전
기및전자공학과 공학석사
1999년 2월 한국과학기술원 전
기및전자공학과 공학박사
1999년 3월~2006년 2월 한국
전자통신연구원 선임연구원

2006년 3월~현재 충남대학교 전자공학과 조교수
2010년 1월~2011년 1월 미국 커네티컷 대학 방문
교수

<관심분야> 광통신 전송시스템, 무선인지 기술, 수
중통신망

손 권 (Kweon Son)

정회원



1988년 2월 경북대학교 전자공
학과 공학사
1991년 2월 경북대학교 전자공
학과 공학석사
1991년 2월~현재 국방과학연
구소 재직
2007년 2월 경북대학교 박사
과정 수료

<관심분야> 수중음향센서네트워크

조 호 신 (Ho-Shin Cho)

종신회원



1992년 2월 한국과학기술원 전
기및전자공학과 공학사
1994년 2월 한국과학기술원 전
기및전자공학과 공학석사
1999년 2월 한국과학기술원 전
기및전자공학과 공학박사
1999년 3월~2001년 2월 한국
전자통신연구원 선임연구원

2001년 3월~2003년 2월 한국항공대학교 전자정보
통신컴퓨터공학부 전임강사
2003년 3월~현재 경북대학교 IT대학 부교수
2010년 1월~2011년 1월 미국 커네티컷 대학 방문
교수

<관심분야> 이동통신시스템, 무선자원관리, 트래픽
제어, 수중음향센서네트워크