

논문 2009-46SP-1-9

# 수중 네트워크에서 제안된 CSMA/CA 프로토콜의 평가

## ( Evaluation of Proposed CSMA/CA Protocol in The Underwater Acoustic Networks )

김 락 훈\*, 심 태 보\*\*

(Lack-Hoon Kim and Taebo Shim)

### 요 약

본 논문은 기존의 CSMA/CA 프로토콜의 지연시간을 감소시키고 전송률을 증가시키기 위해 제안된 CSMA/CA 프로토콜에 관한 연구이다. 수중환경에서 긴 전파시간에 의해 충돌확률이 증가하고, 전송효율이 감소함에 따라 프로토콜의 성능은 저하된다. 이러한 전파시간을 고려하여 본 논문에서는 기존의 CSMA/CA 프로토콜의 TimeOut 상황을 피하기 위해 CTS 패킷에 STANDBY 프레임 삽입하여 전송하는 프로토콜을 제안한다. 모의실험 결과, 제안하는 프로토콜이 기존 프로토콜보다 처리율에서 약 20% 정도의 성능향상을 보였고, 전파지연 대 전송지연  $a$ 의 값이 작을수록 성능이 우수함을 확인하였다.

### Abstract

The purpose of this paper is to propose a CSMA/CA protocol to reduce the delay time and increase the throughput of the original CSMA/CA protocol. In underwater environments, the efficiency of the protocol is reduced due to the increase of the propagation delay time, which results in increase of the collision possibility causing lowering of the transmission efficiency. Considering this propagation delay, this paper propose to insert the STANDBY frame in a CTS packet in order to avoid the TimeOut status of the CSMA/CA protocol. According to the simulated test results, proposed protocol is increased about 20% throughput than original CSMA/CA protocol. And the more value of propagation per transmission delay 'a' is low, the more throughput of protocol is better.

**Keywords :** Underwater Acoustic Communication, Underwater Network, Multiple Access Protocol, CSMA/CA

### I. 서 론

최근 군사적, 상업적 목적으로 수중 환경의 관찰에 대한 관심이 증대되고 있다. 광범위한 해양 관찰을 위한 이상적인 기법으로 수중 무선 센서들로 이루어진 수중 무선 센서 네트워크를 들 수 있다. 수중 센서 노드들은 해양 데이터 수집, 오염 관찰, 근해 탐사, 재해 예방, 항해, 전략적 감시 등의 어플리케이션들에 사용될 수 있다. 수중 환경에 적용하기 위해서는 무선 센서 네트워크와는 다른 제약 조건들을 극복해야 한다.

수중 센서 네트워크의 가장 큰 특징은 통신을 위하여

RF 신호 대신 음파를 사용하는 것이다. 수중에서 전파의 감쇄가 심해 RF 신호는 노드의 최대 전송전력(Full transmit power)으로 1m 이상 전파하지 못하기 때문이다. 또한 긴 전파 지연 시간으로 인해 노드 간의 동기를 맞추기 어렵게 하여 한 수신단에서 서로 다른 수신 패킷 간의 충돌확률이 높아진다. 따라서 통신 시스템 성능을 크게 저하시키는 요인이 된다. 그러므로 기존 육상에서 사용하는 프로토콜은 수중네트워크에 적용할 경우 통신 시스템 성능을 크게 저하시키는 주된 요인이 된다. 따라서 수중환경에 적합한 프로토콜의 설계가 요구된다.

그동안 수중통신 프로토콜 관련 연구는 육상 네트워크 중심으로 이루어지면서 수중에서의 제한요소들을 고려하지 않고 있어 프로토콜의 성능은 현저히 떨어졌다.

\* 학생회원, \*\* 정회원, 숭실대학교 정보통신전자공학부  
(Dept. of Electronic Eng. Soongsil University)  
접수일자: 2008년5월30일, 수정완료일: 2008년12월29일

최근 수중 채널의 물리적 특성을 고려하여 프로토콜 연구가 진행되고 있다.

1998년에 미국에서 시행된 Seaweb 프로젝트에서는 FDMA(Frequency Division Multiple Access)<sup>[1]</sup> 프로토콜을 사용하였으나 대역폭이 좁은 수중 채널 환경에서는 대역폭 효율성이 떨어지고 페이딩과 다중경로에 의한 단점을 가지고 있다. 2001년 Yeo 등에 의해 제안된 MAC은 캐리어 센싱을 기반으로 다중 초음파 전송 채널을 이용하여 수중에서 고속 데이터 전송을 할 수 있도록 하였다<sup>[2]</sup>. 채널 접속시 RTS-CTS 핸드셰이킹을 생략하고 각 채널별 유희 타이머를 사용하여 후보 전송 채널들 중 가장 오랫동안 유희 상태에 있는 채널을 우선적으로 선택하여 데이터를 전송하는 방식이다. RTS-CTS 생략으로 MACA (Multiple Access with Collision Avoidance) 방식보다 전파지연을 줄일 수 있으나 노드의 이동성 방안에 대해선 고려하지 않아 수중 네트워크에 적용시키긴 힘들다. 또한 2006년 조아라 등에 의해 MAC기반의 CSMA (Carrier Sensing Multiple Access) 프로토콜을 제안하기도 하였으나 별도의 실험 및 검증은 없었다<sup>[3]</sup>.

본 연구에서는 효율적인 프로토콜의 설계로 수중의 긴 전달 지연을 줄이고 충돌회피 횡수를 줄여 전송률(Throughput)을 높일 수 있는 CSMA/CA 기반의 수중 접속 제어 프로토콜(MAC, Medium Access Control)을 제안하고자 한다.

## II. 음의 전달 : 경로손실과 노이즈

### 1. 전달손실

주파수 신호  $f$ 에 대하여 거리  $l$ (단위:m)에 따라 수중음향 채널에서 발생하는 전달 손실은 식 (1) 같이 나타낼 수 있다<sup>[4]</sup>.

$$A(l, f) = l^k a(f)^l \quad (1)$$

여기서  $k$ 는 확산인자,  $a(f)$ (단위:dB/km)는 흡수계수이다. 식 (1)을 데시벨(dB)로 표시하면 다음과 같다.

$$10\log A(l, f) = k \times 10\log(l) + l \times 10\log a(f) \quad (2)$$

식 (2)의 첫 번째 항은 경로 손실, 두 번째 항은 흡수 손실로 표현된다. 확산 인자  $k$ 는 전달 형태에 따라 일반적으로 구형 확산일 경우  $k=2$ 의 값을 사용하고, 원통형 확산일 경우  $k=1$ , 실제적인 경우  $k=1.5$ 를 사

용한다. 흡수 계수는 경험적으로 Thorp의 공식을 사용하여 주파수  $f$ 에 대하여  $a(f)$ 는 다음 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$a(f) = \frac{0.11 \times f^2}{1 + f^2} + \frac{44 \times f^2}{4100 + f^2} + 2.75 \times 10^{-4} \times f^2 + 0.003 \quad (3)$$

식 (3)은 일반적으로 수 백 Hz 이상의 주파수에서 사용하고, 이 보다 낮은 주파수에서는 아래와 같은 식 (4)를 사용한다.

$$a(f) = 0.002 + 0.11 \frac{f^2}{1 + f^2} + 0.011 f^2 \quad (4)$$

### 2. 잡음

해양에서의 배경잡음의 원인은 난류, 선박, 파도, 열잡음 네 가지에 의해서 만들어질 수 있다. 배경잡음 원인의 대부분은 통계적 가우시안과 전력 스펙트럼 밀도로 나타낼 수 있다<sup>[1, 5]</sup>. 다음 식 (5)~(8)는 실험적인 공식으로 네 가지 잡음원의 p.s.d.를 주파수의 함수로써 Hz 당 dB re  $\mu\text{Pa}$ 로 나타낸 것이다.

$$10\log N_i(f) = 17 - 30\log f \quad (5)$$

$$10\log N_s(f) = 40 + 20(s - 0.5) + 26\log f - 60\log(f + 0.03) \quad (6)$$

$$10\log N_w(f) = 50 + 7.5\omega^{1/2} + 20\log f - 40\log(f + 0.4) \quad (7)$$

$$10\log N_{th}(f) = -15 + 20\log f \quad (8)$$

난류 잡음은  $f < 10\text{Hz}$ 의 매우 낮은 주파수 영역에서 영향을 받는다. 원거리 선박에 의한 잡음은 10-100Hz 주파수 영역에서 두드러지며, 상대적으로 선박의 움직임에 대하여 0과 1사이의 값을 갖는 선박 활동 인자  $s$ 를 통해 모델링되어진다. 100Hz-100kHz 주파수 영역에서 바람에 의한 파도의 잡음이 잡음을 유발하는 주 소음원이 된다. 특히 Kundsen<sup>[6]</sup>은 바람의 세기가 2배 증가할 때 주변 잡음은 약 5dB 증가하는 것을 보이며 풍력과 주변 잡음 간 상관관계를 밝혔다. 바람에 의한 최대 잡음은 약 500Hz 대역에서 생성된 후 주파수가 증가할수록 옥타브 당 6dB씩 감소한다. 끝으로 열잡음은  $f > 100\text{kHz}$ 의 주파수 영역에서 두드러진다.

### 3. 전파 지연

육상 무선 네트워크는 전달 속도가  $3 \times 10^8 \text{m/s}$ 인

RF를 사용하는 반면 수중에서는 약 1500m/s인 음파를 사용한다. 수중 네트워크에서 노드 사이의 거리가 100m라고 할 경우, 도달 시간은 육상에서 0.33μs인 반면 수중에서는 67ms가 된다. 따라서 육상 RF 채널보다 수중에서의 전파 지연이 더 길고 변화가 심하다. 긴 전파 지연은 노드간 동기를 맞추기 어렵게 된다. 또한 패킷간 충돌확률을 높여 성능 열화에 상당한 영향을 미치게 된다.

### III. CSMA/CA 프로토콜

IFS(Inter-Frame Space)와 backoff 알고리즘과의 관계를 나타낸 CSMA/CA 프로토콜의 기본 방식을 다음 그림 1에 나타내었다. CSMA/CA 프로토콜은 전송 충돌 방지를 위해 임의적인 backoff 메커니즘을 사용한다. 먼저, 패킷 전송을 시도하는 노드는 DIFS(Distributed Inter-Frame Space)만큼의 지연을 갖고 채널이 현재 사용 중인지 감지한다. 이 때 채널이 유휴 상태이면 RTS(Request To Send)패킷을 전송하고, 그렇지 않으면 채널이 유휴 상태가 될 때까지 기다린 후, 다시 DIFS 시간과 임의의 backoff 알고리즘에 의한 지연을 갖은 후 패킷 전송을 재시도 한다. 목적지 노드는 자신이 목적지인 RTS 패킷을 받으면 CTS(Clear To Send) 패킷을 소스 노드에 송신하게 된다. CTS 패킷을 받은 소스 노드는 데이터를 송신하게 되고, 데이터를 수신 받은 목적지 노드는 데이터 수신에 대한 ACK(ACKnowledgement) 패킷을 전송한다.

그림 2는 deferring 접근과 backoff 접근의 원리를 나타내었다.

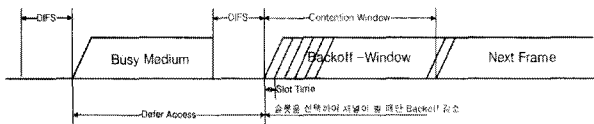


그림 1. CSMA/CA의 기본방식  
Fig. 1. Principle of CSMA/CA.

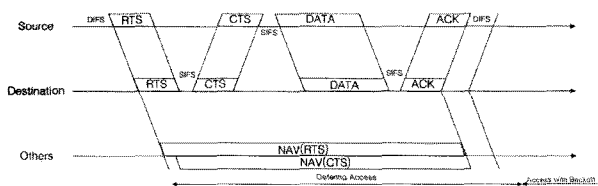


그림 2. deferring 접근과 backoff 접근  
Fig. 2. Deferring and backoff access.

backoff의 지연시간은 식 (9)와 같이 계산하여 구한다.

$$Time_{backoff} = (CW_{min} + INT(CW_{max} - CW_{min}) \times Random()) \times slottime \quad (9)$$

식 (9)에서 CW(Contention Window)는 지연의 범위를 정하는 것으로, 전송시도횟수에 따라 CW\_min(최소값)에서 CW\_max(최대값)사이의 정수값으로 정해진다. Random( )에 의하여 0부터 1까지의 랜덤한 수를 발생하여 CW값에 곱하고 정수화하여 기본 slot time에 곱한다. slot time은 지연의 기준이 되는 단위 시간이다. 위 식에서 Backoff 값은 0과 CW 사이의 임의의 값을 가지며, 패킷 충돌이 발생하면 CW값을 2배씩 증가시킨다.

Backoff Time은 채널의 상태가 비어있을 경우에만 감소한다. 이것은 각 사용자들이 공정한 전송시도를 위한 조정으로서, 최초 경쟁하는 사용자가 다수라 가정할 경우 오래 기다린 사용자는 새로 전송을 시도하는 사용자에 비해 패킷을 전송할 확률이 높게 된다<sup>[7]</sup>. 그림 3에 슬롯 선택확률을 나타내었다.

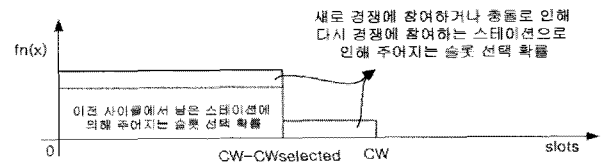


그림 3. 슬롯 선택 확률  
Fig. 3. Probability of slot select.

### IV. 제안하는 CSMA/CA 프로토콜

기존의 프로토콜은 단일 데이터 전송 채널만을 사용하였다. 따라서 목적지 노드가 “busy”상태이면 일정시간 후 다시 RTS패킷을 전송하게 된다. 즉, “TimeOut” 시간을 두어 이 시간이 만료되면 RTS 패킷을 재전송하는 방법이다(그림 4).

TimeOut 시간은 일반적으로 패킷의 RTT(Round Trip Time)에 의해 결정되어지게 되고, 재전송된 RTS 패킷에 대한 ACK로 송신 노드측에서 CTS 패킷을 수신하면 DATA 패킷을 보낸다. 이러한 특징 때문에 충돌확률이 증가하고, 평균 전송지연이 증가하여 데이터 처리량이 감소하게 된다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해 참고문헌 [8]에서는 데이터 전송 채널과는 별도로

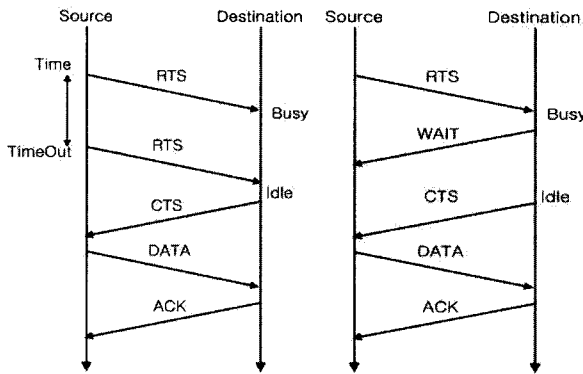


그림 4. TimeOut 상황 Fig. 4. TimeOut situation. 그림 5. WAIT 명령 Fig. 5. The Command WAIT.

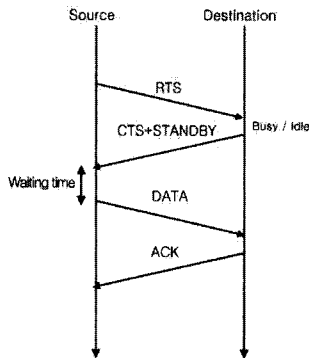


그림 6. 패킷 헤더 포맷 적용 Fig. 6. Modification of packet header format.

Signaling 채널을 두어 WAIT COMMAND 패킷의 전송을 제안했다(그림 5).

본 연구에서는 signaling 채널을 통해 프레임 전송 전에 RTS를 먼저 보내고, 그에 대한 응답으로 CTS-STANDBY를 받고 나서 데이터를 보내는 4-way 교환기법을 이용하는 방식으로써 참고문헌 [8]에서 제시한 별도의 WAIT 패킷 전송 없이 대기시간 정보를 담고 있는 STANDBY 필드를 삽입한 CTS 프레임의 전송을 하는 것이다(그림 6).

이때의 RTS/CTS-STANDBY 프레임은 채널을 “예약”하는 역할을 한다. 채널 예약 과정 중 CTS-STANDBY를 수신하지 못한다면 충돌로 보고, 임의의 back-off시간을 적용하여 RTS를 재전송하게 된다. 별도의 패킷을 전송하지 않는다면 전송지연 시간 단축 및 충돌확률 감소로 인하여 데이터의 처리량을 증가시킬 수 있는 장점이 있다.

1. 제안하는 프로토콜의 MAC 프레임 구조

RTS프레임은 그림 7과 같이 구성되며, 20바이트의

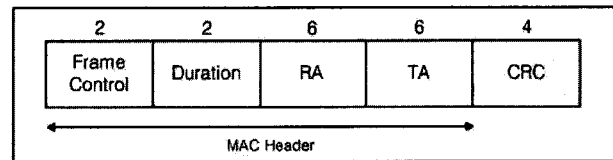


그림 7. 기존 RTS프레임 Fig. 7. Preexistence RTS frame.

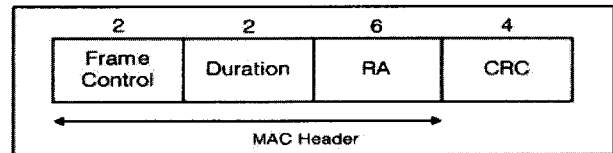


그림 8. 기존 CTS/ACK 프레임 Fig. 8. Preexistence CTS/ACK frame.

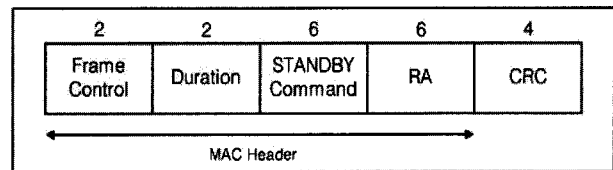


그림 9. 제안하는 CTS-STANDBY 프레임 Fig. 9. Pproposed CTS with STANDBY frame.

길이를 갖는 구조로 RA(Receiver Address)는 수신주소이며, TA(Transmitter Address)는 송신 주소를 나타낸다. 그림 9는 STANDBY프레임을 적용한 패킷의 동작을 나타낸 것이다. STANDBY 필드에는 대기시간의 정보가 삽입되어 있다.

그림 8에서 보면 기존의 CTS 패킷 프레임은 14 바이트의 길이인데 비해 그림 9에서 제안하는 CTS-STANDBY의 패킷 프레임은 기존 프레임에 6바이트 길이의 STANDBY 프레임을 더한 20바이트 길이의 CTS 패킷을 전송한다. 수중에서의 지연 시간은 유동적이므로 고정된 대기시간 값과 적응적인 대기시간 값을 가질 수 있다.

본 연구에서는 기존의 20바이트 길이의 RTS 프레임과 22바이트 길이의 제안된 CTS 프레임, 1000바이트 고정길이의 데이터 패킷, 그리고 14바이트의 ACK 프레임을 전송했을 경우 기존의 프로토콜과 제안하는 프로토콜에 대한 전파 지연시간에 관해 비교해보고자 한다.

2. 시스템 모델

성능 분석을 위하여 본 논문에서 제안한 CSMA/CA 프로토콜은 1-persistent CSMA 방식과 p-persistent CSMA 방식의 혼합된 프로토콜로 모델링하였다. 시간 축은 슬롯크기 a로 나누어 있으며, 모든 패킷은 전송이

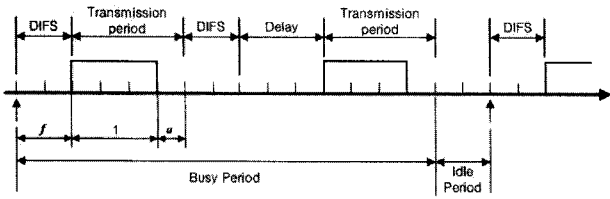


그림 10. CSMA/CA 채널 모델  
Fig. 10. CSMA/CA channel model.

전에 DIFS 지연동안 채널을 감지하고, 전송을 시도한다. 또한 패킷 전송시간은 단위시간 1로 고정하였다고 가정하고 기본단위시간으로 설정하였다. 상대적으로 실제 전송에 소요되는 슬롯수는  $(1/a)$  슬롯이 된다. 따라서 채널의 상태는 그림 10과 같이 busy 기간과 idle 기간의 반복으로 모델링 할 수 있으며, busy 기간은 크게 전송지연기간과 전송기간으로 구성된다. 또한 DIFS는  $\ell$ 개의 슬롯으로 구성되어 있다고 가정하였으며, 따라서 DIFS의 지연시간은  $f = \ell \times a$ 가 된다.

트래픽 모델은 10개의 유한 노드로 구성된 통신망으로 설정하였으며, 한 노드에서 새로운 패킷이 발생한 확률은 기하 분포를 따르는  $p$ 라고 가정하고,  $1-p$ 의 확률로 패킷을 발생하지 않는다( $0 < p < 1$ ). 이때, 충돌에 의하여 재전송을 시도하는 노드에 의하여 발생하는 트래픽과 새로 패킷을 발생하는 트래픽의 합이 평균  $g$ 라고 가정하였다<sup>[9~10]</sup>. 본 논문에서는 유한 모델로서 각 노드는 독립적이고 기하적으로 분포하는 유희기간(idle period)을 갖는다고 가정한다.

채널 모델은 noiseless 채널로 가정하여 전송중의 에러는 패킷간의 충돌에 의한 에러에 비하여 크지 않다고 가정하였다. 각 거리에 따른 노드의 전파지연(propagation delay)은 각각 동일하고 각 노드는 슬롯의 시작점에서 패킷 전송을 시도하도록 동기화되어 있다고 가정하였다. 따라서 슬롯의 중간에 패킷이 발생하여도 각 노드는 다음 슬롯의 시작점에서 채널을 감지하게 된다. 위의 가정들에 의하여 시스템의 상태는 다음의 세 가지 중 하나의 상태에 있게 된다.

- I(Idle state) : 패킷 전송을 준비한 노드가 하나도 없는 상태
- B(Busy state) : 1개 이상의 노드가 패킷 전송을 하는 상태
- U(Useful transmission state) : 실제 전송에 성공하는 상태

본 논문에서 처리율  $S$ 는 다음 식 (10)과 같다. 각  $\bar{I}$ ,  $\bar{B}$ ,  $\bar{U}$ 를 구하여 식 (10)에 대입하여 처리율을 구한다.

$$S = \frac{\bar{U}}{\bar{B} + \bar{I}} \quad (10)$$

[13]에 의하여 식 (10)은 다음 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \bar{U} &= \frac{Mg(1-g)^{M-1}}{1-(1-g)^M} + \frac{1}{1-(1-g)^{((1/a)+a)M}} \\ &\sum_{N=1}^M \sum_{k=1}^M [np(1-p)^{(K+1)n-1}(1-g)^{(k+1)(M-n)} \\ &+ (M-n)(1-p)^{(k+1)n}g(1-g)^{(k+1)(M-n)-1}] \\ &+ np(1-p)^{n-1} \left\{ \binom{M}{n} [1-(1-g)^{((1/a)+1)n}] \right. \\ &\left. (1-g)^{((1/a)+1)(M-n)} \right\} \\ \bar{B} + \bar{I} &= f[1-(1-g)^M] + 1 + a + \\ &+ \frac{1}{(1-g)^{((1/a)+1)M}} ((f+1+a)[1-(1-g)^{((1/a)+1)M}] \\ &+ a \sum_{k=1}^{\infty} (1-p)^k - (1-g)^{((1/a)+1)} [(1-p)^k - (1-g)^k]^M \quad (11) \\ &- a(1-g)^{((1/a)+a)M} \sum_{k=1}^{\infty} (1-g)^{kM} + \frac{a}{1-(1-g)^M} \end{aligned}$$

위 식에서  $a$ 는 전파지연 대 전송지연의 비로 나타낼 수 있고,  $p$ 는 패킷이 발생할 확률,  $g$ 는 트래픽 합의 평균으로 나타낼 수 있다. 또한  $f$ 는 DIFS 슬롯의 크기를 나타내고,  $M$ 은 사용자의 수를 나타낸다.

## V. 시뮬레이션 및 결과

### 1. 수중 시뮬레이션 환경

제안된 CSMA/CA 프로토콜의 성능평가를 위한 환경은 그림 11에서 보는 것과 같이 201m 수심의 동해를 모델로 하여 천해환경을 모의하였다. 음속은 KODC (Korea Oceanographic Data Center)의 실측 데이터를 사용하여 산출하였다.

각 노드에서의 전송 비트율은 10kbps, 전달손실을 고려하여 가용 주파수는 10kHz로 고정하였고, 송신신호 준위는 185dB로 하였다. 각 노드의 수신신호 준위  $S$ 는 송신신호 준위  $SL$ 에서 전달손실  $TL$ 과 소음준위  $N$ 을 뺀 값으로 식 (12)와 같고, 본 연구에서는 데이터 손실이 많은 수중을 고려하여 35dB라고 하였다.

$$S = SL - TL - N \quad (12)$$

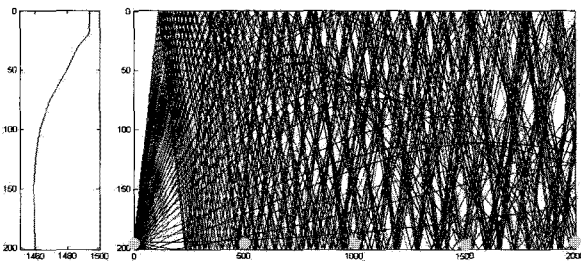


그림 11. 수중통신 채널의 음속구조 및 음선  
Fig. 11. Sound profile and ray of UAC.

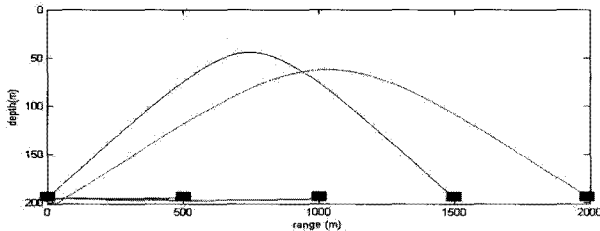


그림 12. 거리에 따른 노드별 고유음선  
Fig. 12. Eigenray of each node according to range.

표 1. 거리에 따른 프로토콜 평가 파라미터  
Table 1. Protocol evaluation parameter according to range.

radius	arrival time(s)	length(m)	PL(dB)	AL(dB)	TL(dB)
0.25 km	0.1716	250.3239	35.97	0.2968	36.2668
0.5 km	0.3427	500.1317	40.48	0.5935	41.8735
0.75 km	0.5141	750.0843	43.13	0.8903	44.0203
1.0 km	0.6854	999.9805	45.0	1.1870	46.1870
1.25 km	0.8869	1315.7652	46.45	1.4838	47.8838
1.5 km	1.0426	1532.9064	47.64	1.7805	49.4285
1.75 km	1.2098	1775.9707	48.65	2.0773	50.7273
2.0 km	1.3796	2021.5107	49.52	2.3740	51.8940

수중소음은 천해에서의 50dB 정도로 분포한다고 가정하였다<sup>[12]</sup>.

송신 해저면과 해수면의 반사 의해 수신되어진 메시지는 손실되고, 직접경로로 수신되어진 메시지에 대한 지연시간, 거리, 경로손실을 계산하였다. 송신 노드와 목적지 노드간의 동기는 맞는다고 가정하였다. 본 연구에서는 도플러 효과 및 페이딩현상은 무시하였다.

노드의 음파 전달거리를 250m에서 2,000m까지 250m 간격으로 늘려가며 시뮬레이션을 하였다. 또한 노드는 해저바닥에 고정되어 있다고 가정하였다. 그림 12는 각 노드로 들어온 고유음선을 나타내었고, 표 1은 두 노드간 거리에 따른 고유음선에 대한 도달 시간, 음선의 길이, 전달손실(TL), 경로손실(PL), 흡수손실(AL)을 나타낸 파라미터 값으로 음의 도달 시간과 거리는 전파 지연 시간 계산에 반영하였다. 경로손실과 흡수손실의

합으로 나타낸 전달손실 값은 송신 전력제어를 위한 파라미터 값으로서 본 연구에서는 배제하였다.

2. 시뮬레이션 결과

본 절에서는 앞에서 제안한 수중 음향 CSMA/CA 프로토콜에 대한 시뮬레이션 결과를 나타내었다.

그림 13은 각각의 반경에 따라 1,000 바이트 길이의 패킷을 보낸다고 가정하고, 최대 처리율을 나타낸 것으로 거리가 증가함에 따라 처리율은 감소하는 것을 볼 수 있다. 그림에서 실선으로 표시된 곡선이 수학적 분석의 결과이고, 점선으로 표시된 것은 각 위치에서의 최대 처리율에 대한 시뮬레이션 결과이다. 각 위치에 대한 전파지연 대 전송지연의 비  $a$ 는 각각 0.21, 0.42,

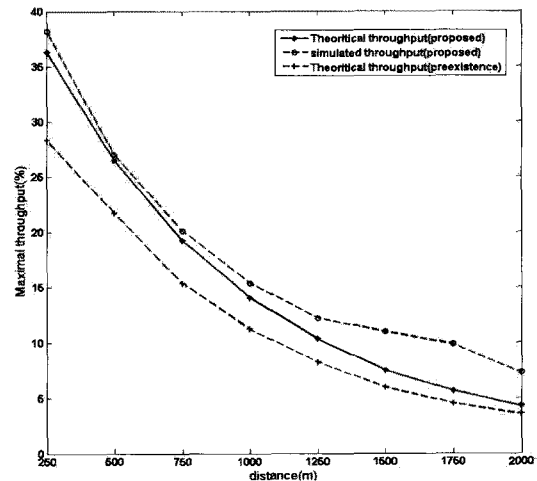


그림 13. 위치에 따른 최대 처리율  
Fig. 13. Maximum Throughput according to the distance.

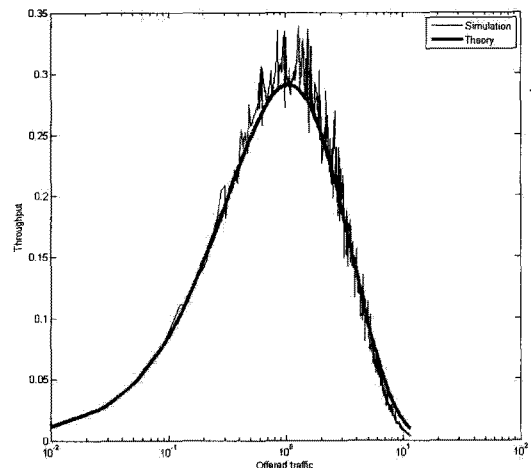


그림 14. 사용자의 수 10일 때 처리율(기존 프로토콜)  
Fig. 14. Throughput when the number of user is fixed at 10(Preexistence).  
( $a=0.21, p=0.03, l=3, distance=250m$ )

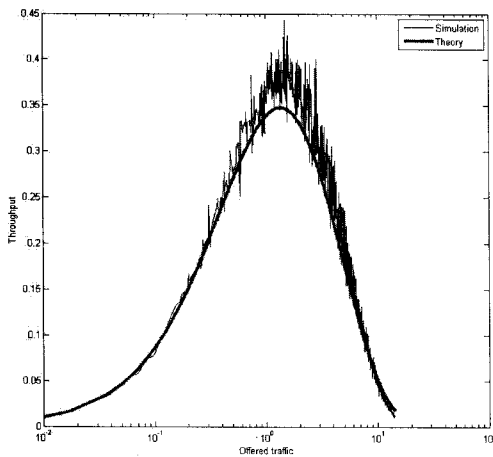


그림 15. 사용자의 수 10일 때 처리율(제안된 프로토콜)  
 Fig. 15. Throughput when the number of user is fixed at 10(Proposed).  
 (a=0.21, p=0.03, l=3, distance=250m).

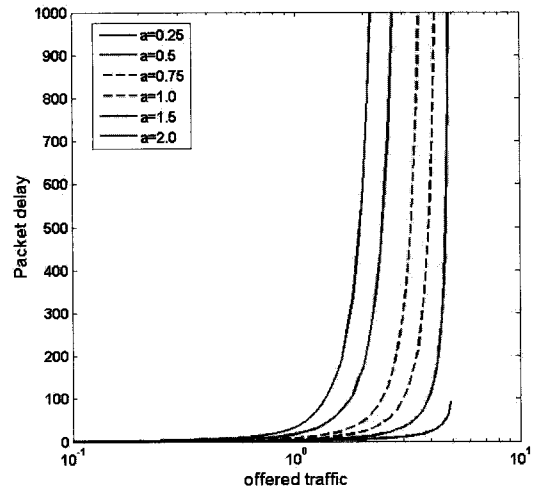


그림 17. a값의 변화에 대한 패킷 지연  
 Fig. 17. Packet delay for varying the a value.  
 (User=10, p=0.03, l=3, distance=250m)

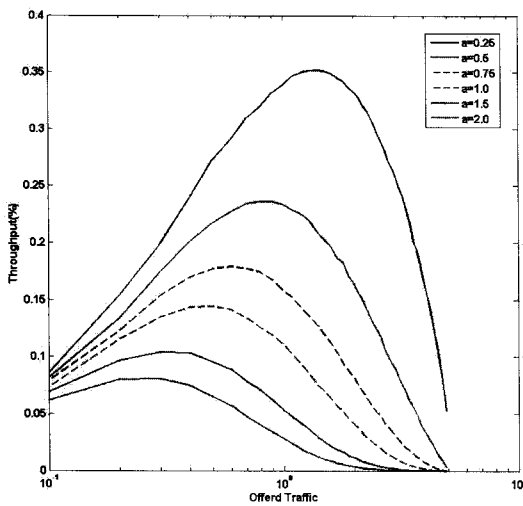


그림 16. a값의 변화에 대한 처리율  
 Fig. 16. Throughput for varying the a value.  
 (User=10, p=0.03, l=3, distance=250m)

0.63, 0.83, 1.04, 1.25, 1.46, 1.66으로 계산하였다. p의 값은 0.03으로 설정하였고, DIFS(f)는 3슬롯으로 고정하였다. 또한 사용자의 수는 10으로 설정하였다.

그래프에서 볼 수 있듯이 수학적 분석의 결과와 시뮬레이션의 결과가 매우 유사함을 알 수 있다. 그림 14와 15에 기존 방식과 제안된 프로토콜의 처리율을 트래픽의 양을 변화시키면서 시뮬레이션 하였다.

짧은 실선으로 표시된 것은 이론적인 분석 결과이고, 가는 실선으로 표시된 것은 시뮬레이션 결과이다. 이 때 네트워크 사용자의 수는 10이고, a슬롯의 크기(a)는 0.21로 고정하였고, p는 0.03으로 설정하였고, DIFS(f)는 3슬롯이다. 그래프에서 볼 수 있는 것처럼 트래픽의 양

이 1이상 증가하면 패킷간의 충돌이 증가하여 처리율이 급격하게 감소하는 것을 볼 수 있다. 또한 기존 프로토콜의 경우, 최대 효율이 트래픽의 양이 약 1.3에서 최대 효율이 약 33.8% 정도이며, 제안하는 프로토콜은 트래픽의 양이 약 1.5일 때, 약 44%의 최대 효율이 나타남을 볼 수 있다.

그림 16과 17은 음파 전달거리가 250m일 경우 a의 변화에 따른 처리율 및 패킷지연을 보이고 있다. a값이 작을수록 처리율이 크다는 것을 볼 수 있다. 또한 그림 17의 경우, 트래픽 양이 증가함에 따라 패킷 지연이 증가하고 a의 값이 클수록 패킷지연은 급격히 증가함을 알 수 있다.

제안된 프로토콜의 성능분석 결과로 같은 조건에서 기존 프로토콜의 성능보다 약 20%의 성능향상을 보였고, 트래픽이 일정량 이상 증가하면, 처리율이 급격하게 저하되었다. 또한 전파지연 대 전송지연의 비(a) 값이 증가할수록 처리율은 낮아지고, 패킷 지연은 급격히 증가함을 알 수 있었다. 그리고 노드의 수가 많을수록 처리율이 낮음을 알 수 있었다.

## VI. 결 론

본 논문에서는 수중 채널에 CSMA/CA MAC 프로토콜을 적용시 문제가 되는 지연을 낮추고 전송효율을 높이기 위해 STANDBY 프레임이 삽입된 CSMA/CA 프로토콜을 적용해보았다.

제안하는 프로토콜을 분석하기 위하여 10개의 유한

가입자 모델을 설정하였고, 시간축은 슬롯 시간  $a$ 로 나누어진 슬롯화 된 모델을 설정하여 분석하였다.

분석 결과에 의하면, 제안하는 프로토콜은 기존의 프로토콜보다 각 거리별 위치한 노드에서 최대 처리율이 약 20% 정도 향상하였고, 수학적 분석 값과 시뮬레이션을 통해 얻어진 값이 유사한 것을 알 수 있었다. 그리고 전파 지연 대 전송 지연의 변화에 따른 처리율 분석에서는  $a$ 의 값이 증가할수록 처리율은 감소하였으며, 패킷지연 또한 급격하게 증가하는 경향을 보였다. 따라서 수중 네트워크를 구성하기 위해서는 전파 지연 대 전송 지연의 비를 수중환경에 맞게 적절한 크기로 설정되어야 할 것이다.

하지만 본 논문에서는 몇 가지 수중 환경변수를 배제하여 시뮬레이션을 하였다. 향후 실제 해양환경에 영향을 미치는 다중경로 및 도플러 효과, 페이딩 현상 등의 영향을 고려한 실험과 뿐만 아니라 노드 전력제어에 관한 실험을 할 예정이다.

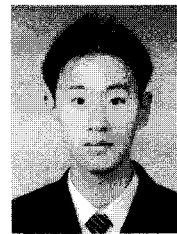
## 참 고 문 헌

- [1] J. Proakis, J. Rice, E. Sozer and M.Stojanovic, "Shallow water acoustic networks," in Encyclopedia of Telecommunications, J. G. Proakis, Ed. John Wiley and Sons, 2003.
- [2] J. K. Yeo, Y. K. Lim and H. H. Lee, "Modified mac(media access control)protocol design for the acoustic-based underwter digital data communication", IEEE, pp. 364-368, ISIE 2001, Pusan, Korea.
- [3] 조아라, 최영철, 김승근, 임용곤, "수중음향 Ad-Hoc 네트워크를 위한 접속제어 프로토콜 설계", 선박해양 기술, 제42호, pp. 35~43, 2006
- [4] E. M. Sozer, M. Stojanovic, and J. G. Proakis, "Underwater acoustic networks", IEEE journal of oceanic engineering, Vol.25, No. 1, pp. 72~83, Jan. 2000.
- [5] M. Stojanovic, "On the relationship between capacity and distance in an underwater acoustic communication channel", WUWNet'06, Sep. 2006.
- [6] V. O. Knudsen, R. S. Alford and J. W. Emling, "Digital communications. Journal of Marine Research", 7(12): 410, 1948.
- [7] 전중오, 조성민, "IEEE 802.11의 MAC에서 DCF를 위한 수정된 백오프 알고리즘의 설계와 성능분석", JCCI2002.
- [8] H. Doukkali, L. Nuaymi, S Houcke, "Distributed

MAC Protocol for Underwater Acoustic Data Networks", Vehicular Technology Conference, 2006.

- [9] L. Kleinrock, F. A. Tobagi, "Packet Switching in Radio Channels:Part I - Carrier Sense Multiple Access Modes and Their Throughput-Delay Characteristics," IEEE Trans. on Communication, vol.com-23, no. 12,pp1400-1416, Dec. 1975.
- [10] H. Takagi, L. Kleinrock, "Throughput Analysis for CSMA Systems," IEEE Trans on Communication. vol.com-33, no.7, pp627-638, Jul. 1985.
- [11] Simon Haykin and Michael Moher, "Analog and Digital Communications Second Edition", 한티미디어, p 471~477. 2007.
- [12] L. B. Bertholf, "Shallow Water Ambient Noise Level in the Tongue of the Ocean", 1969.
- [13] R. Rom, M. Sidi, "Multiple Access Protocol Performance and Analysis", Springer-Verlag, 1989.

## 저 자 소 개



김 락 훈(학생회원)  
2007년 숭실대학교 정보통신전자공학과 학사 졸업.  
2007년 3월 ~ 현재 숭실대학교 전자공학과 석사 과정  
<주관심분야 : 수중음향통신, 수중네트워크, 수중음향 신호처리>



심 태 보(정회원)  
1974년 서울대학교 문리대 졸업  
1980년 서울대학교 문리대 석사 졸업(물리 해양학 석사)  
1986년 미국 Louisiana 주립 대학교 졸업  
(물리 해양학 박사)

1986년~2005년 국방과학연구소  
해양/음향 연구실장,  
해양기술부장,  
해군무기체계 개발본부 본부장 역임  
2005년~현재 숭실대학교 정보통신전자공학부 교수  
<주관심분야 : 수중음향모델링, 수중음향 신호처리, 수중음향통신, 수중음향 영상처리>