

# UWB 전송망에서의 효과적인 음성 데이터 전송

김종환\*, 구명현\*, 이현석°, 신정호\*\*

## An Effective Transmission for Vice Traffic in UWB Mobile Ad Hoc Network

Jong-hwan Kim\*, Myung-hyun Koo\*, Hyunseok Lee°, Jeong-ho Shin\*\*

### 요 약

본 논문에서는 UWB의 광대역 주파수와 낮은 신호세기의 특성을 이용해서 기밀한 음성 통신이 가능하고, 이동 ad hoc 네트워크로 동작하도록 하여 단말의 이동이 가능한 전송망용 MAC 프로토콜의 효과적인 음성 데이터 전송 기법을 제안하였다. 기존의 UWB MAC 프로토콜은 대부분 단말 간 동기화를 지원하여 전력 소모, 대역폭과 같은 자원 활용에 중점을 두었으나, 본 논문의 UWB MAC 프로토콜은 단말의 이동성에 중점을 두어 비동기 방식으로 구동된다. 또한 효과적인 음성 데이터 전송을 위해서 RTS/CTS 패킷을 사용하지 않고, 재전송 과정이 없다. 해당 음성 데이터 전송 방식의 시뮬레이션을 통하여 성능을 측정하였다.

**Key Words** : UWB, Ad hoc network, Tactical network, MAC, G.729

### ABSTRACT

In this paper, we propose a transmission scheme of MAC protocol that enables secure voice communications by exploiting the wide spectrum and low signal strength characteristics of the ultra wide band technology. In addition, it also supports high level of terminal mobility by deploying mobile ad hoc network schemes. While most of existing UWB MAC protocols are operated as a synchronous mode, the proposed scheme operates in an asynchronous mode for supporting high mobility and sends voice packets without RTS/CTS control packets for efficient voice traffic transmission without retransmission. With simulation program, we prove that the proposed scheme satisfies the required voice quality and packet delivery time.

### I. 서 론

무선통신 기술은 다양한 형태로 빠르게 발전해왔다. 그 중 UWB(ultra wide band) 통신 시스템은 다른 통신 시스템과 달리 시스템의 신호가 넓은 주파수 대역에 걸쳐 낮은 세기로 전송한다. 다른 통신 시스템에서는 이 신호가 잡음으로 인식되어 감청이 어렵기 때문에 군용 네트워크에 활용이 꾸준히 검

토되어 왔다. ad hoc 네트워크는 중앙 제어 장치 없이 자체적으로 임시 망을 구축하여 통신이 가능한 네트워크를 말한다. ad hoc 네트워크가 오래전부터 연구되어 왔음에도 활성화가 되기 어려웠던 이유는 기지국이나 액세스 포인트와 같은 중앙 제어 장치가 없으므로 통신망의 동작이 노드 간의 연결성이나, 전파 상태, 전력 한계 등에 영향을 많이 받기 때문이다. 또한 단말의 이동에 따라 수시로 망의

※ 본 연구는 민군겸용기술사업비 지원으로 수행되었습니다.

◆ 주저자 : 광운대학교 전자통신공학과, hwan238@kw.ac.kr, 학생회원

° 교신저자 : 광운대학교 전자통신공학과, hyunseok@kw.ac.kr, 정회원

\* 광운대학교 전자통신공학과, 9head@kw.ac.kr, 학생회원

\*\* (주)CITOPIA, adaptive@citopia.co.kr, 정회원

논문번호 : KICS2013-02-077, 접수일자 : 2013년 2월 1일, 최종논문접수일자 : 2013년 4월 3일

형태가 변화하기 때문에 네트워크의 구성과 유지가 어렵다.

본 논문은 분대 단위 병력이 도감청과 교란이 어려우면서도 자유롭게 이동하면서 음성통화를 할 수 있는 통신시스템을 기술적으로 설계하는 것을 목표로 하고 있으며, 특히 통신시스템의 여러 계층 가운데 MAC(media access control) 부계층을 주된 내용으로 다루고 있다. 설계된 MAC 규격은 음성 데이터 전송에 특화시키기 위해 기존의 IEEE 802.15.4 표준을 변형, 수정하였다. 예를 들어, 음성 데이터는 실시간으로 전송되어야 하므로, 데이터 손실 시에 복구하는 과정이 불필요하여 재전송 과정이 없다. 다른 예로는, 단말기들의 동작시간을 동기화를 시키지 않는다. 단말기들이 계속적으로 이동하는 경우 동기화를 안정적으로 유지하기 어렵기 때문이다. 그리고 음성 프레임의 길이가 짧기 때문에 RTS(request to send) / CTS(clear to send) 패킷 교환 방식을 사용하게 되면 데이터 전송 효율이 저하되므로 적용하지 않는다. 음성 데이터를 전송할 때 사용하는 음성 코덱은 G.729로, 현재 음성 통신에서 가장 보편적으로 사용되고 있으며 높은 통화 품질을 가진다는 장점이 있다. 또한 MOS(mean opinion score)값에 따라 약 10%의 데이터 손실이 있어도 통화 가능한 품질을 보장한다.

논문에서 제시하는 MAC 프로토콜 이외에도 UWB MAC 프로토콜은 이전부터 연구되어 왔으며 Enhanced WPAN-based mac, Time-hopping 기반 분산 mac, U-MAC(proactive and adaptive UWB mac) 프로토콜 등이 있다<sup>[1]</sup>. Enhanced WPAN-based mac은 zigbee와 같은 협대역 WPAN mac을 UWB 기술에 적용시키는 방법이다. 이 기법은 CSMA/CA 방식을 사용하지 않고 TDMA 방식을 사용하며, 간단한 슈퍼프레임 구조를 가지는 동기 통신이다. 본 논문의 단말은 단말 간의 이동성을 고려한 비동기 통신을 전제로 하기 때문에 차이가 있다<sup>[2]</sup>. Time-hopping 기반 분산 mac은 단말기가 자체적으로 터미널 기능도 할 수 있는 TerminoNode로서, 분산된 MAC 모델(distributed MAC model) 형태라는 점은 본 논문과 매우 흡사하나, 단말 간에 동기화가 필요한 점에서 차이가 있다<sup>[3]</sup>. U-MAC 프로토콜은 결정적으로 멀티 홉 모델에서의 검증이 되지 않아 부적합하다<sup>[4]</sup>. 따라서 군용 통신에 적합한 UWB MAC 프로토콜을 직접 구상하였다. 본 논문에서 전술망 특성을 고려하여 효과적인 음성 데이터 전송을 위해 적용한 사항들을 요약하면 다

음과 같다. 첫째로, 단말기의 이동의 특성에 맞춘 비동기 통신 방식을 채택하였다. 단말기는 보행자 속도로 끊임없이 이동하므로 망의 형태가 계속 변하여 단말 간에 동기화 시키는 과정이 매우 어렵고 복잡하다. 따라서 단말 간 비동기 통신이 이루어지도록 한다. 둘째로, 음성 데이터의 특성에 맞춘 데이터 전송 방식이다. 본 논문의 MAC 프로토콜에서는 음성 데이터 길이가 매우 짧고, 통신 거리가 넓어 대부분의 단말을 포함할 수 있으므로 은닉 노드 문제가 발생할 확률이 적어 RTS/CTS 메시지 교환이 비효율적이다. 이러한 특성을 고려하여 RTS/CTS 메시지 교환 과정을 포함하지 않았다. 또한 주로 음성 데이터를 교환하기 때문에 데이터에 대한 재전송 과정이 없다. 음성 데이터 재전송 과정이 실시간 전송에 영향을 줄 수 있기 때문이다. 셋째로, RSSI(received signal strength indication)를 이용하여 라우팅 경로를 설정한다. 본 논문의 MAC 부계층에서는 네트워크 계층에 라우팅 경로에 관한 정보를 알려주기 위해 인접한 단말로부터 데이터를 수신할 때마다 RSSI값을 기록해 놓는다. 네트워크 계층은 MAC 부계층으로부터 RSSI값을 받아 라우팅 경로를 설정한다.

이러한 특징을 갖는 MAC 프로토콜의 성능을 검증하기 위한 시뮬레이션을 수행했다. 첫 번째 실험으로, 음성호 간 시간 간격에 의해 발생하는 불균일한 전송 성공률을 안정화하기 위해 임의 백오프(random back-off) 시간을 음성 데이터 발생 주기인 40msec까지 증가시켰다. 이때 음성호 간 시간 간격이 전송 성공률에 미치는 영향을 없애고 안정적인 전송 성공률을 얻을 수 있었다. 두 번째 실험으로, 첫 번째 실험을 거친 시스템의 시험망에서 최대 전송 홉 수(Hmax)와 최대 동시 통화 수(Cmax)를 변화시켜 그 성능을 평가하였다.

## II. 연구 배경

### 2.1. Ultra wide band

UWB 통신 시스템은 미 국방부에서 군사용 무선 통신기술로 사용하다 민간에 개방된 통신 시스템이다<sup>[5]</sup>. 그림 1과 같이 UWB 통신 시스템은 낮은 세기의 신호를 넓은 주파수 대역에 전송한다. 따라서 타 통신시스템과 주파수 대역이 겹치더라도 잡음으로 인식되기 때문에 주파수 공유가 가능하다. 또한 넓은 주파수 대역을 활용하기 때문에 통신 감청을 피할 수 있고 통신 교란에 강하여 군용 통신 시스

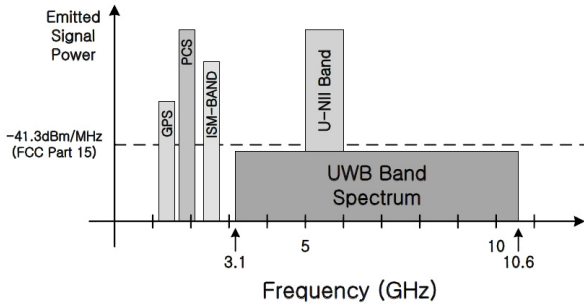


그림 1. UWB 스펙트럼.  
Fig. 1. UWB Spectrum.

템에 적합하다. 민간에 개방되면서 주파수 부족 문제를 해결하는 대안으로 고려되고 있다.

### 2.2. Ad-hoc 네트워크

Ad hoc 네트워크는 기지국과 같은 기반설비 없이 단말기들이 자율적으로 구성하는 통신망으로 데이터 수집용 통신망, 재난지역 통신, 군사 통신에 적합하다. 기지국이 담당하는 시간 동기, 자원 관리, 망 구성 작업들을 단말들이 분산된 형태로 수행해야 하므로 그 동작이 일반적인 네트워크와 상이하다. ad hoc 네트워크의 동작은 단말기의 이동 정도, 전송되는 데이터의 특성, 전원 공급 방법 등에 따라 달라진다. 본 논문에서 고려하는 ad hoc 네트워크는 군에서 작전 중에 소대 규모의 병력이 서로 통신하는데 사용하는 것을 목적으로 한다. 따라서 단말기들은 달리는 보행자의 이동 속도를 최대 속도로 가지면서 음성 데이터와 단문 메시지를 그 전송 내용으로 한다. 이와 같은 ad hoc 네트워크의 특성은, 네트워크 계층의 동작에 많은 영향을 미친다. 본 논문에서는 이들 가운데 MAC 부계층의 동작을 다룬다.

### 2.3. MAC 부계층

MAC 부계층은 다수의 단말이 효과적으로 무선 자원을 공유하는데 필요한 동작을 정의한 계층이다. MAC 부계층의 동작은 단말기 간의 동기 여부, 무선 자원 점유 방식, 물리 계층의 동작 방식, 전력 최소화 방식에 따라 다양하게 분류된다. ad hoc 네트워크에서는 기지국이 존재하지 않기 때문에 단말간 동기화를 위해서는 단말들이 분산된 형태로 동기화 작업을 해야 한다. 그러나 이는 망 운영을 어렵게 하는 측면이 많아서 본 논문에서 제안하는 ad hoc 네트워크에서는 비동기 통신을 사용한다. 채널 공유는 ad hoc 네트워크의 경우 무선자원을 중앙

관리할 주체인 기지국이 없으므로 단말기들이 협력하여 수행한다.

### 2.4. G.729

G.729는 ITU(International Telecommunications Union)에서 제정한 음성 코덱(voice codec) 표준이다<sup>[6]</sup>. 코덱은 입력 정보의 보안, 처리 속도 향상, 저장 공간 절약 등을 위해 다른 형태나 형식으로 변환시키는 부호화 과정과 부호화된 정보를 원래의 정보로 복원시키는 복호화 과정을 수행한다. 본 연구에서는 병사통신을 위해 많은 종류의 음성 코덱 가운데 G.729를 사용한다. G.729는 VoIP(voice over internet protocol)를 지원하는 가장 보편적인 코덱으로 다른 코덱에 비해 음성 데이터를 효율적으로 압축시킬 수 있다는 장점을 가진다. G.729는 음성 데이터를 8Kbps까지 압축이 가능하고, 동시에 인코딩 시간이 10~40msec로 가변적이며, 유선전화망(toll-quality) 수준의 통화품질을 제공할 수 있다.

### 2.5. MOS (Mean opinion score)

음성 데이터의 품질 정도를 평가하는 방법으로 MOS가 있다<sup>[7]</sup>. MOS는 1점에서 5점까지 5단계로 구분되며, 각 단계마다 데이터의 품질과 그 특징을 나타낸다. MOS는 음성 데이터를 받은 수신자가 데이터의 품질을 평가하여 결정된다. MOS값이 4.0 이상이면 일반 유선 전화의 품질과 비슷한 수준(toll-quality)이다. 만족스러운 음성 품질을 얻기 위해서는 MOS값이 최소 3.0 정도 되어야 한다. G.729 음성 코덱을 이용할 때, 약 10%의 음성 프레임들이 전송 과정에서 누락되어도 통화가 가능한 수준의 품질을 보장할 수 있다<sup>[8]</sup>.

## III. 병사통신용 MAC 프로토콜

### 3.1. 병사 통신 시스템

본 논문에서 고려하는 병사 통신 시스템은 분대 단위 전투 병력들이 작전 중에 사용하는 통신 시스템으로 그 특징은 표 1에 정리되어 있다. 이 병사 통신 시스템은 물리계층에서 DS-UWB(direct spreading ultra wide band) 방식을 사용한다. 이 방식에서는 송신 신호의 에너지가 넓은 주파수 대역에 확산되어 전송되므로 감청이 어려운 장점이 있다. 또한, 시간 영역에서 살펴보면 전송 신호의 길이가 짧아 정밀한 위치 추적에도 사용될 수 있다. 이 병사 통신 시스템은 음성 통화와 단문 전송 기

표 1. 병사 통신 시스템의 사양.  
Table 1. Specification of tactical communication systems.

| Items                       | System characteristics |
|-----------------------------|------------------------|
| Physical layer              | DS-UWB                 |
| Service types               | voice and SMS          |
| Terminal mobility           | pedestrian             |
| Synchronization             | asynchronous mode      |
| Access point                | none                   |
| Channel number              | 1                      |
| Maximum number of terminals | 12                     |
| Maximum Tx range            | 300 meter              |

능을 제공한다. 이 시스템의 최대 데이터 전송률을 음성 데이터를 전송할 수 있는 수준으로 제한한 것은 구현 가능한 UWB 기술을 이용하여 가능한 넓은 영역에서 음성 통신이 가능하도록 만들기 위해서이다. 이 시스템에서 단말기의 이동속도는 병사들의 이동 속도를 감안하여 보행자 수준으로 가정한다. 기지국을 설치할 수 없는 작전 지역에서도 통신이 가능해야 하므로 기지국을 사용하지 않는 ad hoc 네트워크를 하였으며 단말기들은 서로 동기화되지 않는다. 한 분대를 12명으로 가정하여 최대 단말기의 수는 12대이다. 한 분대가 작전 시 최대한 멀리 떨어질 수 있는 상황을 300m 정도로 고려했다. 표 1과 같은 병사 통신 시스템의 사양을 만족하기 위한 MAC 프로토콜의 구체적인 동작과 특징을 다음절에서 제안하고자 한다.

### 3.2. 병사 통신용 MAC 프로토콜

#### 3.2.1. 무선 자원 공유 방식

이 시스템에서 사용한 무선 자원 공유 방식은 CSMA/CA(carrier sense multiple access / collision avoidance)이다<sup>9)</sup>. 가능한 다른 방식인 pure-ALOHA 방식에서 단말기는 무선 자원의 사용 유무를 확인하지 않고 즉시 데이터를 전송하고 성공 여부를 응답 메시지(acknowledge message)로 확인받는다<sup>10)</sup>. 그러나 pure-ALOHA 방식에서는 이미 다른 사용자가 무선 자원을 점유하고 있을 경우에도 전송을 하여, 충돌이 발생하므로 상대적으로 전송 효율이 낮다.

많은 수의 CSMA/CA 방식에서는 단말기가 무선 자원의 점유 상황을 CCA(clear channel assessment)

과정을 통해 확인 후, 사용 중이면 다음 기회에 전송한다. 그러나 UWB 방식의 통신시스템은 전송하려는 신호가 넓은 주파수 대역에서 낮은 세기로 전송되기 때문에 다른 단말기의 RF 단에서 이 신호를 검출하기 쉽지 않다. 이 문제를 해결하기 위해서 본 논문에서 제안하는 병사통신 시스템에서는 송신기가 미리 정한 부호열(code sequence)을 메시지의 중간에 주기적으로 삽입하고 수신기들은 상관도(correlation)계산을 통해 간접적인 CCA 과정이 이루어질 수 있도록 한다. 이 때 자기상관도함수(auto-correlation function)가 임펄스 함수(impulse function)인 부호열이 CCA 과정에 사용된다. 상관도 계산의 결과가 임의의 값 이상이면 무선 자원이 사용되고 있다고 판단한다. CCA 과정을 위한 상관도 계산은 물리계층에서 수행된다. 이와 같은 간접적인 CCA 과정은 RF 단에서 수신 에너지 측정을 통해 직접 검출이 이루어지는 경우에 비하여 상대적으로 그 검출 시간이 길고 그 정확도가 떨어지지만 충돌이 발생할 경우와 비교하면 그 지연시간이 무시할 수 있는 수준이다. 임의의 전송 지연 시간(random back-off) 이후 CCA 과정을 통해 무선 자원이 사용되지 않고 있음을 확인하면 데이터를 전송한다. 이와 같은 임의의 전송 지연은 복수의 단말들이 동시에 CCA 동작을 통해 무선 자원이 사용가능하다고 판단하여 서로 충돌하는 경우를 피하기 위해서이다.

CSMA/CA 기반의 다수의 무선통신 시스템에서는 데이터의 전송 이전에 RTS와 CTS 제어 메시지를 송수신 노드들 사이에 교환하여 은닉 노드 문제(hidden node problem)를 해결한다. 그러나 이 논문에서 제안하는 병사통신용 시스템에서는 RTS/CTS 제어 메시지를 사용하지 않는다. RTS/CTS 프레임 교환 방식을 사용할 때에 데이터가 어느 정도 이상의 크기를 가지고 있어야 좋은 효율을 나타내기 때문이다<sup>11)</sup>. 본 논문에서 제안하는 병사 통신 시스템에서는 MAC 데이터 프레임의 길이가 32byte로 그 길이가 RTS/CTS 프레임과 비슷하다. 따라서 이상적인 무선 환경에서 은닉노드 문제없이 데이터 전송이 이루어지는 경우를 가정하면 RTS/CTS 프레임을 사용하는 경우 MAC의 최대 데이터 전송용량이 약 1/3정도로 줄어들게 된다. 무엇보다도 병사통신 시스템의 최대 통신 거리가 300meter이므로 작전 범위가 충분히 최대 통신거리 안에 포함될 수 있다고 판단된다. 또한 음성 데이터의 경우 충돌에 의해 데이터가 유실되더라도 음성복호화기가 유실된 부분

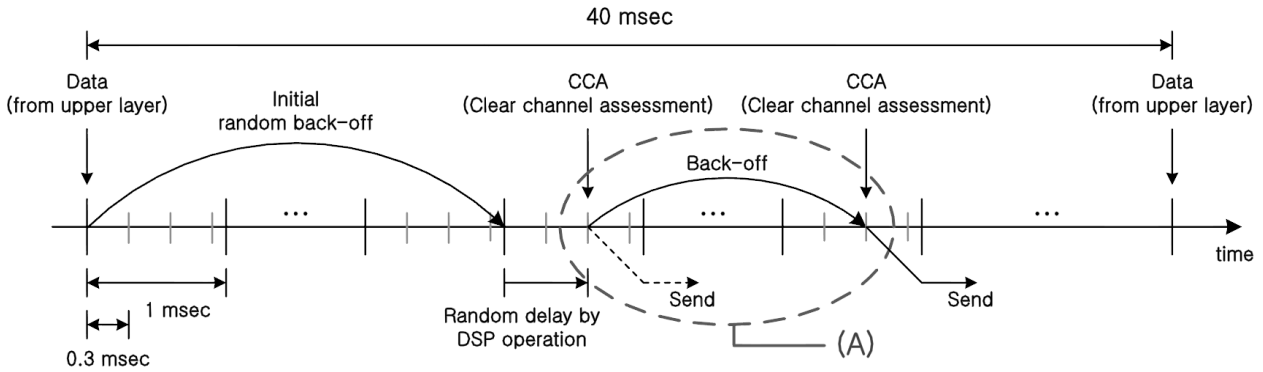


그림 2. UWB 단말기의 데이터 송신 과정.  
Fig. 2. Data transmission procedure of the two terminal.

을 효과적으로 복원할 수 있다.

### 3.2.2. 데이터 송/수신 동작

그림 2는 본 논문에서 제안하는 병사통신용 MAC 프로토콜에서 한 단말기가 수행하는 MAC 동작을 나타내고 있다. 송신 요청을 받는 데이터는 제어 메시지 혹은 음성 메시지이다. 제어 메시지의 경우 발생 주기가 불규칙적이며, 음성 메시지의 경우 G.729 음성 코덱의 데이터 인코딩 시간 표준에 따라 상위 계층으로부터 40msec마다 발생된다. 송신이 요청된 메시지는 바로 송신되지 않고, 0~40msec사이의 임의의 백오프 시간 동안 지연된다. 그림 2에서는 이 시간을 “초기 임의의 백오프 시간”(initial random back-off)이라 명명했다. 메시지를 송신 요청 발생 시점에 곧바로 보내지 않고 먼저 임의의 시간을 지연시키는 이유는 다른 노드의 메시지와 충돌이 연속적으로 일어날 확률을 낮추기 위해서이다. 또한 초기 임의의 백오프 시간의 범위를 0~40msec로 둔 이유는 4장의 실험 결과의 실험을 근거로 상세히 설명하였다. 임의의 지연 시간이 지난 후 CCA 과정으로 채널이 사용 가능하면 데이터를 송신한다. 반대로, CCA 결과 다른 노드가 이미 채널을 사용하고 있으면 다시 임의의 백오프 시간(random back-off) 동안 전송을 지연 시키는데, 이 시간은 1, 2, 3msec 중에서 결정한다. 백오프 시간과 동작에 대한 내용은 그림 3에서 설명한다. 그림 2에서 점선으로 표기한 (A)는 송/수신 동작의 예시로서 초기 임의의 백오프 시간 이후 CCA 결과에 따라 데이터를 송신할 것인지 지연시킬 것인지 결정하는 과정이다. 만약 CCA 결과 채널이 사용 중이면 다시 1, 2, 3msec 중 임의의 시간 동안 전송 지연 시킨 뒤 재송신을 요청한다. “DSP에 의한 임의의 지연 시간”(random delay by DSP operation)

은 DSP의 동작이 정확한 시간에 이루어지지 않는 상황을 고려하기 위해 적용된다.

그림 3은 그림 2와 같이 동작하는 단말기들의 연동 절차를 보여준다. 설명을 위해 3개의 단말기를 가정하였다. A, B, C 세 단말기는 한 채널을 공유하여 데이터를 송신하며 그 동작을 시간의 변화에 따른 그래프로 나타냈다. 각 단말기는 초기 임의의 백오프 시간을 거친 이후에 채널 사용을 요청하며 이미 다른 단말기가 먼저 채널을 점유하여 사용하고 있는지 CCA 과정을 통해 확인한다. 이 예에서는 단말기 A가 CCA 과정으로 아무도 채널을 사용하고 있지 않은 것을 확인한 뒤 점유하여 사용한다. 이후 단말기 B와 단말기 C 또한 송신 이전에 CCA 과정을 거쳐 채널의 사용 여부를 확인하지만 단말기 A가 먼저 사용하고 있기 때문에 단말기 B와 단말기 C는 1, 2, 3msec 중 임의의 백오프 시간 이후 재전송을 요청한다. 이때 다시 CCA 과정을 통해

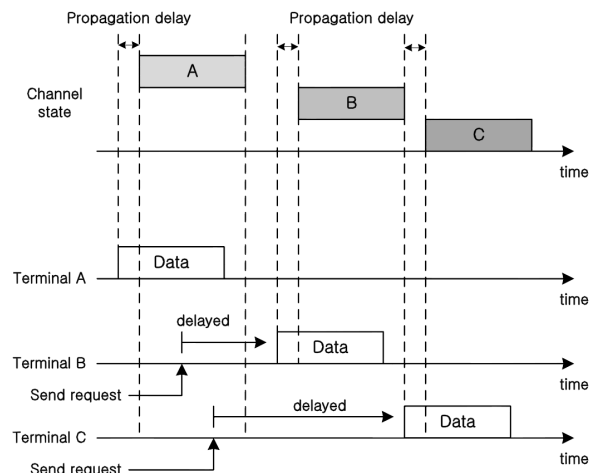


그림 3. MAC 계층에서 단말기들의 연동 절차.  
Fig. 3. Interaction procedure between terminals in the MAC layer.

채널을 사용할 수 있으면 데이터를 송신하고, 그렇지 않으면 다시 한 번 임의의 백오프 시간 동안 데이터 전송을 보류한다. 제안하는 병사 통신 시스템에서 이와 같은 데이터 전송 보류는 최대 두 번 일어난다. 전송 보류 과정을 세 번 이상 필요로 할 만큼 데이터량이 많지 않고, 시뮬레이션 결과 백오프 횟수 초과에 의해 데이터 손실이 발생하는 경우가 거의 없어 그 이상의 백오프 동작은 불필요했다. 전송 지연 가능 시간을 최대 3msec로 제한한 것은 지연 시간이 길어질수록 다른 단말기의 전송 시간에 영향을 줄 수 있고, 실시간성을 떨어뜨릴 수 있기 때문이다. 또한 4장의 실험 결과를 참조하면 초기 임의 백오프 시간을 거친 데이터는 충분히 분산되어 있으므로 또다시 긴 전송 지연시간을 가질 필요가 없다. 백오프 시간 단위를 1msec로 정한 것은 이 수치가 구현된 시스템에서 의미 있는 최소의 시간 단위이기 때문이다. 이 시스템에서 한 데이터 프레임이 무선 채널을 점유하는 시간은 약 0.5msec이므로 1msec 이하의 백오프 시간은 무의미하다.

그림 3에서 전파 지연(propagation delay)은 다른 단말기의 채널 사용 상태를 알기까지 소요되는 시간이다. 이 값은 무선신호가 공중에서 전파되는 시간과 수신단에서 도착한 신호를 처리하여 신호 전송 여부를 검출하는데 필요한 시간을 합한 것이다. 따라서 한 단말기가 채널 사용을 요청한 뒤 전파 지연 시간이 흐르기 전에 다른 단말기가 채널 사용을 요청하게 되면 채널이 사용 중임을 알지 못해 결과적으로 두 단말 간에 충돌이 발생하게 된다.

### 3.2.3. 메시지의 종류에 따른 동작

제안하는 병사 통신 시스템에서 MAC 계층은 전송되는 데이터의 성격에 따라 그 세부 동작 절차가 달라진다. 크게 보면 MAC 계층에서 전송되는 메시지는 i) MAC 계층의 동작을 제어하는 “MAC 제어 메시지”와 ii) 상위 계층에서 전달되는 “데이터 메시지”가 있다. MAC 제어 메시지는 신뢰성 있는 전달이 보장되어야 하므로 수신단에서 정상적으로 수신되었음을 알리는 응답 메시지를 송신단으로 회신한다. 송신단에서는 정해진 시간 이내에 응답 메시지가 도착하지 않으면 전송오류가 있었던 것으로 판단하여 메시지를 재전송한다.

한편으로 데이터 메시지는 전달되는 데이터의 성격에 따라 응답 메시지 전송 여부가 결정된다. 데이터 메시지가 상위 계층의 제어메시지를 포함하는 경우 신뢰성 있는 전달을 위해 수신단에 응답 메시

지 전송을 요청한다. 반면에 데이터 메시지가 음성 데이터인 경우는 응답 메시지를 요청하지 않는다. 이는 음성 데이터의 실시간 특성 때문이다. 음성 데이터를 재전송하려면 G.729 코덱에서 음성 데이터를 생성하는 간격인 40msec보다 긴 시간이 소요될 수 있어 다음에 생성되는 음성 데이터보다 늦은 시간에 재전송이 일어나게 된다. 그러므로 재전송된 데이터가 다음 데이터보다 늦게 도착하게 되고 이는 음성 데이터의 실시간 특성을 만족하지 못하므로 음성 데이터 복원에 사용할 수 없다. 그렇지만 음성 복호화기는 전송과정에서 누락된 음성 프레임의 내용을 이웃한 두 프레임의 내용으로 유추하여 복원하는 기능을 가지고 있어 그 영향이 최소화된다.

### 3.2.4. 주변 단말기 검색

그림 4와 같이 MAC 부계층에서는 네트워크 계층이 망을 구성하는 것을 지원하기 위해서 비콘 요청 메시지(beacon request message)와 비콘 메시지(beacon message)가 존재한다. 비콘 요청 메시지는 송신될 때 복수의 단말기들이 이 메시지를 수신할 수 있도록 목적지 주소를 방송주소(broadcasting address)로 설정한다. 비콘 요청 메시지를 받은 주변의 단말들은 이에 대한 응답으로 비콘 메시지를 전송한다. 비콘 메시지를 받은 단말은 비콘 메시지에 포함된 네트워크 계층 정보를 자신의 네트워크 계층에 전달하여 주변에 존재하는 단말을 파악할 수 있도록 한다. 모든 단말은 서로 비동기 동작하므로 여기서 사용하는 비콘 메시지에서는 IEEE 802.15.4의 비콘 메시지 형식과 달리 슈퍼프레임 필드를 사용하지 않는다. 그 외의 비콘 메시지 내부 필드는 네트워크 계층에서 사용한다.

### 3.2.5. 전달 경로 설정

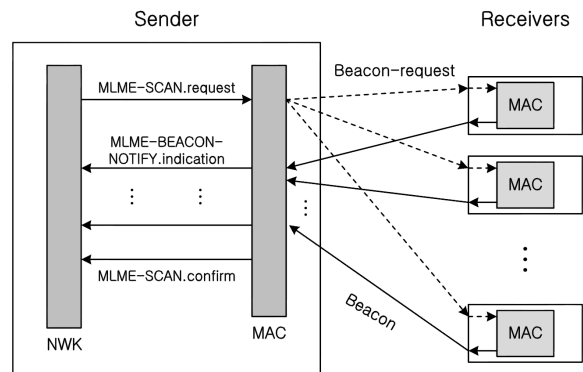


그림 4. 비콘 메시지 교환 과정.  
Fig. 4. Beacon message transmission flow.

MAC 부계층은 네트워크 계층이 최적의 전송경로를 선택하기 위해 필요한 정보를 제공한다. 멀티 홉 통신 모델에서 데이터를 주고받는 두 단말 간의 전송 과정에서 어떤 중간노드를 선택하는가에 따라 데이터의 전송 지연 시간, 전송 오류율 등이 달라진다. 제안하는 시스템에서는 MAC 부계층이 상대방 단말로부터 수신한 데이터의 신호 세기 측정값인 RSSI(received signal strength indication)를 수집하여 네트워크 계층에 제공하며 네트워크 계층은 이 값을 이용하여 전송경로를 결정한다. 그러나 실제적으로 RSSI값이 나타내는 것은 해당 단말기로의 송신 경로 품질이 아닌 수신 경로의 통신 품질이므로 오차가 발생할 수 있다. 이와 같은 문제를 최소화하기 위해서 MAC 계층은 어떤 단말에 대해서 수신한 RSSI값을 저장해 두었다가 이 노드를 목적지로 하여 전송되는 메시지가 있으면 수신한 RSSI값을 포함시켜 전송한다. 이를 통해 노드들은 이웃하는 노드들에 대한 송신 선로의 RSSI값을 적정하게 구할 수 있다.

### 3.2.6. 음성 데이터 주기성의 고려

음성 데이터는 주기적으로 발생된다. 따라서 음성 통화의 시작 시점이 결정되면 그 이후로 통신망에 일정한 주기로 부하를 발생시킨다. 이와 같은 특성 때문에 병사 통신망에서 복수의 호가 진행될 때 이들 사이의 시작 시점의 차이에 따라 그 성능이 달라진다. 예를 들면 동시 통화중인 2개의 음성호가 있다고 가정하면 이들의 음성 데이터 발생 시점이 가까울수록 충돌률과 전송 오류 확률이 증가하므로 음성 데이터 전달 성공률이 낮아지고 종단 간 음성 데이터 전달 시간이 길어진다. 본 논문에서는 이와 같은 문제를 해결하기 위해서 음성 데이터 발생 노드에서 음성 데이터를 전달하기에 앞서 그림 2에서와 같이 전체 시간에 대한 초기 임의 백오프 과정을 한 차례 거치도록 한다. 이를 통해 음성 데이터 전송시점이 음성 데이터 발생 주기에 걸쳐 고르게 분포되도록 한다. 그 결과 4장 실험의 그림 6에서 보인 것과 같이 음성호 시작 시점이 서로 달라지더라도 균일한 성능을 보이게 되어 통신망의 안정성이 높아졌다.

## IV. 실험 결과 및 분석

### 4.1. 실험 개요

3장에서 제안한 MAC 프로토콜의 성능을 분석하기 위해 모의실험을 실시하였다. 모의실험을 위해 C++ 언어 기반의 이산 사건 시뮬레이션 라이브러리

리(discrete-event simulation library)를 제공하는 SSIM을 사용하였다<sup>[12]</sup>. 본 논문에서 제안하는 MAC의 동작이 다른 프로토콜에 비해 상대적으로 간단하여 내용이 방대한 NS-2(network simulator 2) 환경을 사용하지 않았다.

이 장에서 설명하는 모의실험의 목적은 제안된 MAC의 동작이 병사통신의 요구사항을 정상적으로 만족시키는지 확인하는 것이다. 병사통신 시스템은 ad hoc 네트워크로 그 동작 형태가 다양해서 이를 모두 모의 실험하는 것은 불가능하다. 이는 망의 형태에 따라 송신 노드와 수신 노드 사이에서 데이터를 중개하는 노드의 수가 달라지고, 또한 무선채널을 공유하는 노드들의 수도 달라져 데이터 전송 시간, 데이터 전송 성공 확률이 달라지기 때문이다.

따라서 적정한 실험을 위해서는 병사통신망의 동작을 대표할 수 있는 망의 형태를 찾는 것이 중요하다. 본 연구에서는 이를 위해 가능한 여러 종류의 망 형태 가운데 데이터 발생량이 가장 높은 망의 형태를 선정하고, 이와 같은 망 조건에서도 병사통신의 요구사항이 만족되면 다른 경우에도 모두 만족됨을 보임으로 제안된 MAC의 적정성을 입증한다.

데이터 발생량이 가장 많은 망의 형태를 결정하기 위해서 최대 동시 통화 수, 최대 전송 홉 수가 사전에 결정되어야 한다. 최대 동시 통화 수(Cmax)는 망에서 지원 가능한 최대 동시 음성 통화 수를 의미한다. 음성 통화는 2대의 단말기 사이에서 일어나므로 Cmax값이 n이면 2n의 단말기들이 음성 데이터를 송수신하는 상태가 된다. 홉 수는 한 음성 통화의 데이터를 전달하기 위해서 수행된 데이터 송신 횟수를 의미한다. 예를 들면 두 노드가 음성 통화를 수행중이고 이 데이터를 전달하기 위해서 중간에 1 개의 노드가 놓여있다면, 음성 데이터의 전달을 위해 2번의 데이터 송신이 이루어졌으므로 이때의 홉 수는 2이다. 여기서 최대 전송 홉 수(Hmax)는 시스템에서 허용하는 최대 홉 수이다. 홉 수가 증가할수록 데이터 전달 시간이 길어지므로 특히 음성과 같은 실시간 데이터는 전달시간에 제한이 가해진다. 이 논문에서 제안하는 병사통신 시스템에서 목적하는 서비스는 음성 통화이므로 Cmax와 Hmax값에 따라 설계된 시스템이 만족할만한 성능을 내는지 살펴볼 필요가 있다.

그림 5는 논문에서 제안하는 MAC의 성능을 분석하기 위한 예시로, Cmax=2, Hmax=3인 조건에서의 시험망 형태이다. 이 그림에서 원은 단말기들의



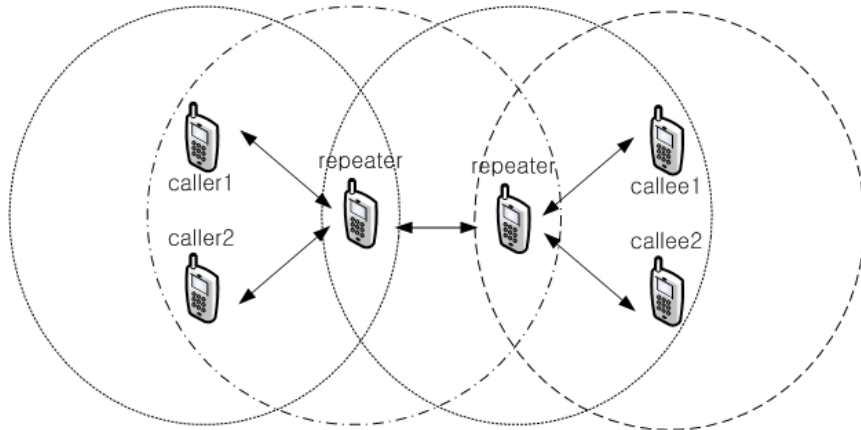


그림 5.  $C_{max}=2$ ,  $H_{max}=3$ 인 경우 시험망의 구조.  
Fig. 5 The structure of the test network when  $C_{max}=2$  and  $H_{max} = 3$ .

무선 신호 도달 범위를 표시한다.  $C_{max}=2$ 이므로 이 망에서는 2개의 호가 동시에 처리된다. 동시에 지원되는 호들은 모두 3홉을 거쳐 연결되므로  $H_{max}=3$ 인 조건을 만족한다. 또한, 두 호가 중간노드를 공유하기 때문에 중간 노드에서 데이터 전달 시 발생하는 지연시간이 최대화된다. 이 시험망을 일반화시킨  $C_{max}=n$ ,  $H_{max}=m$ 인 경우 망의 형태를 예상해보면, 왼쪽 끝의 원에  $n$ 개의 송신 노드가 배치되며 오른쪽 끝의 원에  $n$ 개의 수신 노드가 배치된다. 동시에 송신 노드들과 수신 노드들 사이에  $m-1$ 개의 중간노드가 배치된다.

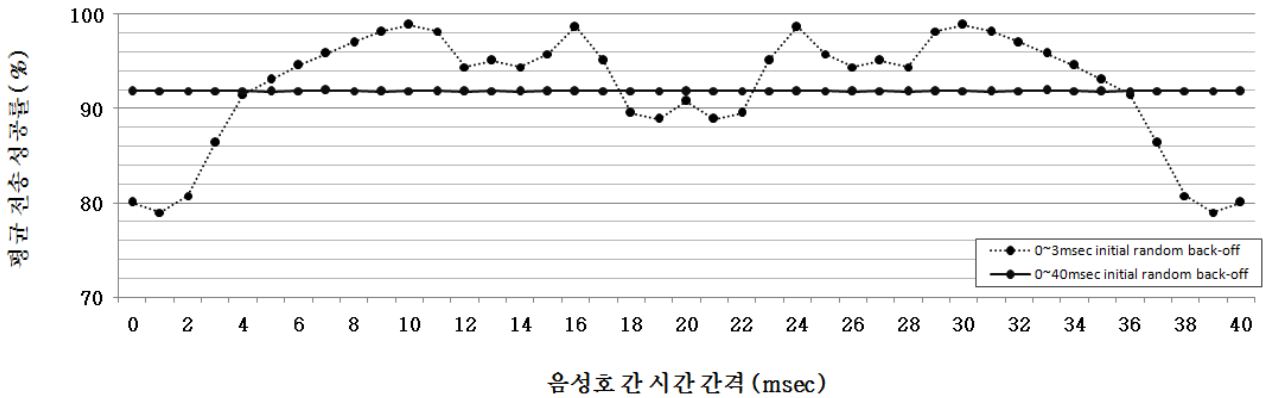
#### 4.2. 실험결과

그림 6의 두 그래프의 공통 가로축인 음성호 간 시간 간격은 음성호의 발생 시점 간격이다. 음성호 발생 시점은 상위 계층으로부터 데이터 송신 요청을 받은 시점으로, 초기 임의 백오프 과정을 거치기 전이다. 만약 단말이 초기 임의 백오프를 하지 않고 상위 계층으로부터 송신 요청을 받자마자 곧바로 데이터 송신 요청을 한다면, 여러 단말 간의 음성호 간 신호간격에 따라 데이터가 집중되는 현상이 생길 수 있다. 예를 들어 그림 5의 시험망에서 2개의 음성호 간 시간 간격이 10msec이면 모든 단말의 음성 데이터 발생 시점은 0, 10, 20, 30, 40, 50msec, .... 지점들이 된다. 또 다른 예로 음성호 간 시간 간격이 1msec이면 모든 호의 음성 데이터 발생 시점은 0, 1, 2, 3, 4, 40, 41msec, .... 지점들이 된다. 두 예시를 비교하면 후자의 경우가 데이터 집중 현상이 훨씬 크다는 것을 알 수 있다. 데이터가 집중된다는 것은 특정 시간 동안 더 많은 데이터가 이동한다는 의미이므로 높은 충돌률을 유발할 수 있다. 또한 모든 단말의 음성 데이터 발생 주기가

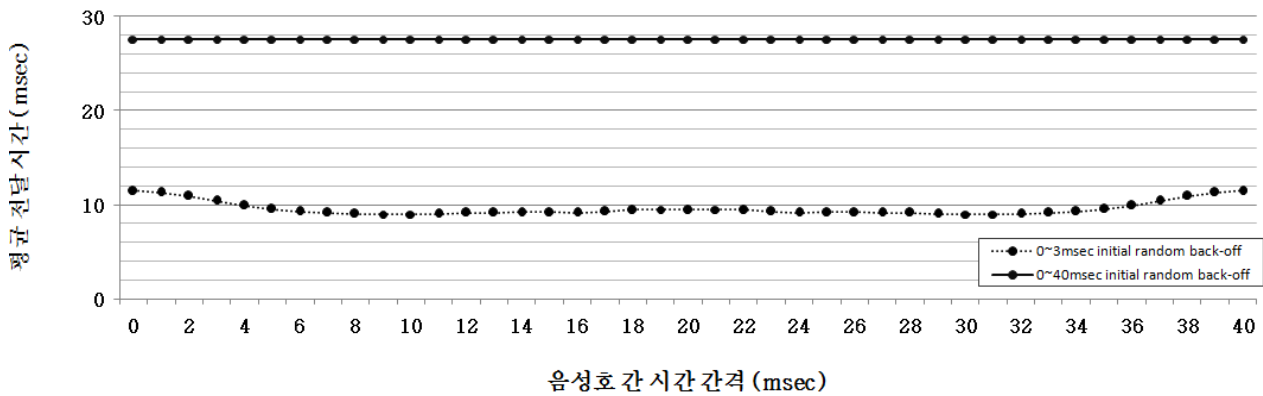
40msec로 동일하기 때문에 시간이 지나도 단말 간 음성호 간 시간 간격은 변하지 않는다. 예를 들어 단말 A와 단말 B의 음성호 발생 시점이 각각 0msec, 2msec 지점이면 음성호 발생 주기인 40msec 이후에는 40msec와 42msec 지점이 되므로 2msec의 음성호 발생 시간 차이가 변하지 않는다. 그러므로 단말기들의 음성호 발생 시점이 특정 시간에 집중되는지 따라 시스템의 전체 성능이 크게 좌우될 수 있다. 그림 6(a)에서 점선으로 나타난 그래프는 초기 임의 백오프 시간이 0~3msec 일 때의 전송 성공률로, 음성호 간 시간 간격에 따라 성공률이 크게 변화하고 있음을 보여준다. 음성호 간 시간 간격이 매우 짧을 때에는 데이터가 집중되기 때문에 충돌로 인한 데이터 손실이 많아져 최대 80% 이하까지 감소하고, 10msec 정도 되는 지점에서는 데이터가 고루 분산되어 전송 성공률이 95% 이상으로 증가하였다. 따라서 음성호 간 시간 간격이 전송 성공률에 결정적인 영향을 끼친다는 사실을 그림 6(a) 그래프로 확인할 수 있다. 또한 앞의 설명에서는 초기 임의 백오프를 하지 않는다는 가정을 했지만 실험 결과를 통해서 0~3msec의 초기 임의 백오프 시간이 데이터 집중 현상을 분산시키기에는 매우 짧은 시간임을 알 수 있다. 단말 간 통화는 특정 시점에 일어나는 것이 아니라 무작위로 일어나는 사건이므로 이러한 불안정성은 시스템 성능에 큰 악영향을 줄 수 있다.

이러한 음성호 발생 시점의 영향을 줄이기 위해 초기 임의 백오프 시간을 음성 데이터 발생 주기인 40msec까지 늘렸다. 이때 음성호 발생 시점 근처에서만 데이터 송신이 일어나지 않고, 다음 음성 데이터 요청 이전 중 어느 시점에서도 송신 요청이 발생할 수 있기 때문에 음성호 발생 시점에 관계없이





(a)



(b)

그림 6. 음성호의 발생 시점 차이에 따른 a)음성 데이터 전송 성공률과 b)음성 데이터 전달 시간의 변화.  
 Fig. 6. The variation of a)average percentile of successful voice frame transfer and b)average network delay for voice frame transfer while changing on generation time between two voice calls.

단말의 데이터가 분산될 수 있다. 그림 6(a)에서 실선으로 나타난 그래프는 초기 임의 백오프 시간이 0~40msec일 때의 전송 성공률로, 음성호 간 시간 간격에 상관없이 전송 성공률이 약 92%로 균일하게 나타나고 있다. 따라서 음성호 발생 시간이 전체 성능에 미치는 영향을 없애고 안정적인 전송 성공률을 확보할 수 있게 된다.

그림 6(b)는 음성호 간 시간 간격에 따라 0~3msec의 초기 임의 백오프 시간을 갖는 시스템과(점선 그래프), 0~40msec의 초기 임의 백오프 시간을 갖는 시스템의(실선 그래프) 음성 데이터 전달 시간의 변화를 나타낸 그래프이다. 이 그림에서 0~3msec의 초기 임의 백오프 시간을 갖는 시스템의 전달 시간은 9~12msec로, 0~40msec의 초기 임의 백오프 시간을 갖는 시스템의 전달시간인 29msec 비해 약 20msec 짧다. 초기 임의 백오프이 0~40msec인 시스템에서 증가한 20msec은 음성호 시작 시점의 영향을 없애기 위해 늘어난 지연 시간의 평균값이다. 음성 데이터 전달

시간은 약 29msec로 증가하였지만 이 값은 통상적으로 음성통화에서 사용자가 불편을 느끼기 시작하는 음성 데이터 전달시간인 150msec보다 현저하게 작으므로 통화 품질에 영향을 미치지 않는다<sup>13)</sup>. 이후의 모든 실험 결과는 음성호 시작 시점의 영향을 제거하기 위해 0~40msec의 초기 임의 백오프 시간이 적용된 환경에서 얻어진 것이다.

다음으로, Cmax와 Hmax의 변화에 따른 i) 음성 데이터 전송 성공률과 ii) 평균 음성데이터 전달 시간을 관찰한다. 음성데이터 전달 오류는 전달 과정에서 MAC 계층의 충돌이 발생하여 음성 데이터가 폐기되기 때문에 발생한다. 실험 결과 그림 7과 같이 Hmax와 Cmax가 증가할수록 전송 성공률이 감소하고, 전달 시간이 증가한다. Hmax의 증가는 전송 홉 수의 증가를 의미하고 이에 따라 데이터의 전달 시간이 길어져 다른 호의 데이터의 이동 시간과 겹칠 확률이 높아진다. Cmax의 증가는 동시 통화 수의 증가를 의미하므로 같은 시간 동안 발생하는 데이터양이 증가하여 총

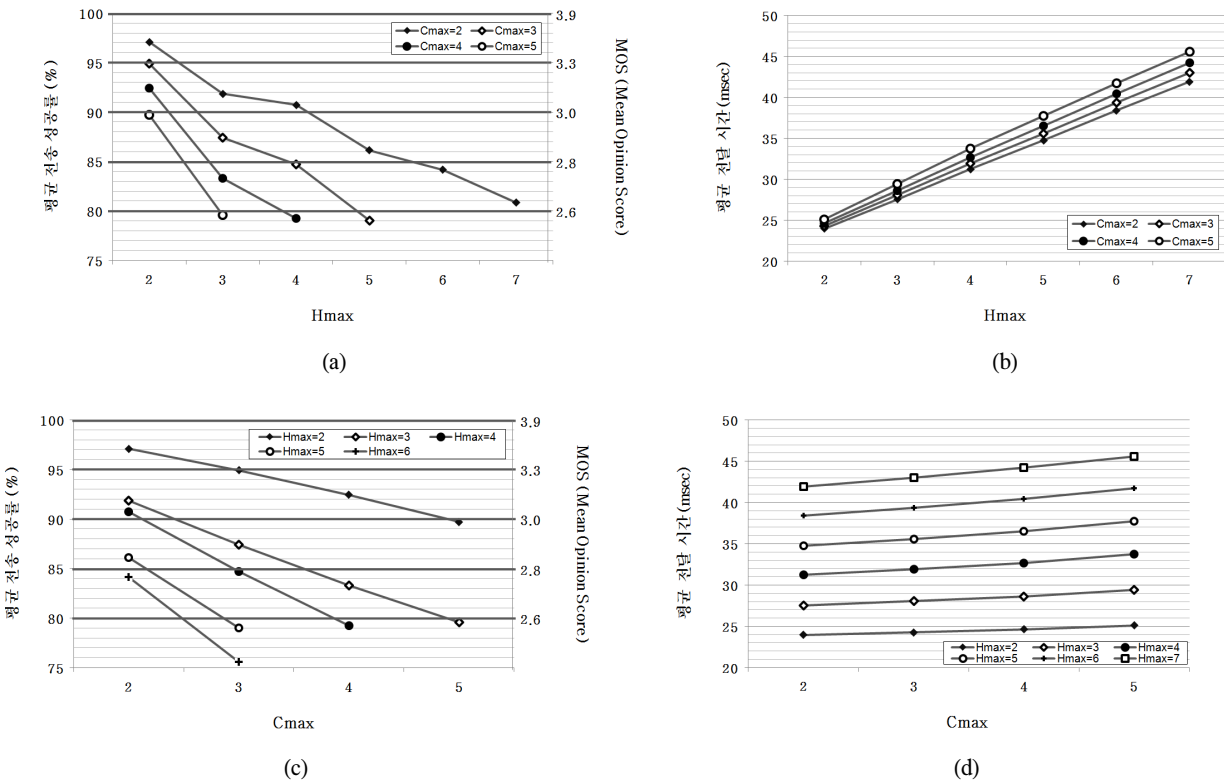


그림 7. Hmax값 변화에 따른 (a)평균 음성 데이터 전송 성공률과 (b)평균 음성 데이터 전달 시간의 변화와 Cmax값 변화에 따른 (c)평균 음성 데이터 전송 성공률과 (d)평균 음성 데이터 전달 시간의 변화  
 Fig. 7 The variation of (a)average percentile of successful voice frame transfer, (b)average network delay for voice frame transfer while changing Hmax and (c)average percentile of successful voice frame transfer, (d) average network delay for voice frame transfer while changing Cmax.

돌 확률이 높아진다. 또한 데이터 전달 시간이 소폭 증가하는 것은 데이터 집중 현상으로 인해 백오프가 발생할 확률이 증가하기 때문이다.

그림 7(a)와 (c)는 Hmax와 Cmax에 따른 전송 성공률과 MOS를 비교하여 통신 가능한 수준의 전송 성공률을 측정하였다. MOS가 3.0 이상일 때 무난한 통화가 가능하므로 동시 통화 수신 Cmax가 2일 때 Hmax가 4호를 초과하거나, Cmax가 3이상이 되면 2호 통신을 제외한 모든 통화 품질이 현저히 낮아지게 된다. 따라서 동시 통화 수가 2일 때에는 최대 4호 통신을 지원할 수 있으며, 동시 통화 수가 3이상이 되면 2호 통신까지 지원할 수 있다.

그림 7(b)와 (d)는 평균 음성 데이터 전달 시간으로, Hmax와 Cmax값에 따라 일정하게 증가한다. 음성 데이터 전달 시간이 중요한 이유는 화자와 청자 사이에 지연 시간이 충분히 짧아야 원활한 대화가 가능하기 때문이다. 음성 데이터 전달 지연 시간의 허용 가능 범위는 150msec이므로 Cmax가 2일 때 Hmax가 4 이상인 경우에도 충분히 통화가 가능하다<sup>12)</sup>. 그러므로 그림 5의 병사통신 시험망에서 Cmax가 2일 때, 최대

4호 통신 까지 음성 통화를 지원할 수 있으며, Cmax가 3이상이고 Hmax가 2인 음성 통화도 지원할 수 있다. 실험 결과를 전체적으로 종합할 때 전송 성공률에 가장 큰 영향을 끼치는 주된 원인은 두 가지가 있다. 첫째로, 음성호의 시작 시점과 Hmax값이다. 두 원인은 모두 무선 통신의 특성으로 나타나는 은닉 노드 문제(hidden node problem)에 의한 것이다. 이 문제는 RTS/CTS 패킷의 교환으로 해결할 수 있으나 본 MAC 프로토콜의 음성 데이터의 크기를 고려할 때 매우 비효율적이므로 적용하지 않았다. 둘째로, 채널 상태를 인식하기까지 소요되는 전파 지연 시간(propagation delay)에 의한 충돌이다. 한 단말기가 채널을 점유하여 사용하고 있다라도 채널의 상태 변화를 인식하기까지 지연 시간이 소요되기 때문에 채널을 공유하는 두 대 이상의 단말기가 전파 지연 시간 간격보다 짧은 시간 이내에 데이터 송신 요청을 하게 되면 충돌이 발생한다. 이 원인은 채널의 특성에 의한 것이므로 개선이 불가능하다.

## V. 결 론

본 논문에서는 초광대역 주파수에서 동작하는 MAC 프로토콜을 설계하고 시뮬레이션 프로그램으로 그 성능을 예측하였다. 먼저 이 시스템의 특징이 이동 ad hoc 네트워크 형태의 무선 실시간 음성 통신이라는 점을 고려하였다. 첫 번째로, ad hoc 네트워크에서는 망의 형태가 정해져 있지 않으므로 시뮬레이션을 위해 데이터 부하가 큰 모델을 제안하였으며 최대 동시 통화 수와 최대 전송 홉 수에 따른 성능을 비교하였다. 두 번째로, 실시간 음성 통신에서의 중요한 특징인 데이터 전송 성공률과 전달 시간을 본 MAC 프로토콜의 성능 지표로 두어 최대한으로 가능한 시험망을 구성하였다. 그러나 음성 데이터의 길이가 짧아 RTS/CTS 패킷 교환 방식은 비효율적이므로 사용하지 않았다. 이때 무선 통신 상황에서 발생할 수 있는 은닉 노드 문제가 전체 시스템 성능 저하에 큰 영향을 끼쳤다. 또한 채널 특성에 의해 발생하는 전파 지연 시간이 시스템의 성능을 떨어뜨렸다. 실험 결과, 본 논문의 시험망에서 최대 동시 통화 수를 두 호로 고정시켰을 때 최대 네 홉 떨어진 단말과의 통신이 가능하였고, 최대 동시 통화 수가 세 호 이상일 때 전송 홉 수가 증가하면 전송 성공률이 급격히 떨어져 최대 두 홉 거리의 통신이 가능하다는 것을 확인할 수 있었다.

## References

- [1] M.S.I.M. Zin and M. Hope, "A review of UWB MAC protocols", in *Proc. IEEE Advanced Int. Conf. Telecommun. (AICT) 2010*, pp. 526-534, Barcelona, Spain, May, 2010.
- [2] F. Legrand, I. Bucaille, S. Hethuin, L. De Nardis, G. Gaincola, M. Di Benedetto L. Blazevic, and P. Rouzet "U.C.A.N's ultra wide band system: MAC and routing protocols", in *Proc. Int. Workshop Ultra Wideband Syst. (IWUWBS)*, Oulu, Finland, June 2003.
- [3] F. Cuomo and C. Martello, "MAC principles for an ultra wide band wireless access", in *Proc. IEEE Global Telecommun. Conf. (GLOBECOM)*, pp. 3548-3552, San Antonio, U.S.A., Nov. 2001.
- [4] R. Jurdak, P. Baldi, and C. V. Lopes, "U-MAC: a proactive and adaptive UWB medium access control protocol", *J. Wireless Commun. Mobile Computing*, vol. 5, no. 5, pp. 551-566, Aug. 2005.
- [5] Federal Communications Commission, "Revision of Part 15 of the commission's rules regarding ultra-wideband transmission systems", ET Docket 98-153, pp. 1-118, Feb. 2002.
- [6] ITU-T, "Coding of speech at 8 kbit/s using conjugate-structure algebraic-code-excited linear-predictive (CS-ACELP) coding", ITU-T Recommendations G-729, Mar. 1996.
- [7] ITU-T, "Methods for subjective determination of transmission quality", ITU-T Recommendations P.800, Aug. 1996.
- [8] L. Ding and R. A. Goubran, "Assessment of effects of packet loss on speech quality in VoIP", in *Proc. IEEE Int. Workshop Haptic, Audio Visual Environments Their Applicat. (HAVE)*, pp. 49-54, Ottawa, Canada, Sep. 2003.
- [9] L. Kleinrock and F. A. Tobagi. "Packet switching in radio channels : Part I - carrier sense multiple access modes and their throughput-delay characteristics", *IEEE Trans. Commun.*, vol. 23, no. 12, pp. 1400-1416, Dec. 1975.
- [10] N. Abramson, "The ALOHA system - another alternative for computer communications", in *Proc. AFIPS Computer Fall Conf. 1970*, pp. 281-285, Montvale, U.S.A., Nov. 1970.
- [11] H.-C. Lee, "The effect of station mobility on the performance of wireless ad hoc-based LAN", *J. KICS*, vol. 35, no. 6, pp. 141-148, June 2010.
- [12] C. Antonio, *SSim - A Simple Discrete-Event Simulation Library(2012)*, Retrieved Feb. 2012, from <http://www.inf.usi.ch/carzaniga/ssim/index.html>.
- [13] ITU-T, "One-way transmission time", ITU-T Recommendations G.114, Feb. 1996.

김 종 환 (Jong-hwan Kim)



2011년 2월 광운대학교 전자통신공학과 졸업.  
2011년 3월~현재 광운대학교 전자통신공학과 석사 과정

이 현 석 (Hyunseok Lee)



1992년 2월 KAIST 전기및전자공학과 졸업  
1995년 2월 POSTECH 전기전자과 석사  
2007년 8월 U. of Michigan, Ann Arbor, CSE, Ph.D.  
1992년 2월~2008년 8월 삼성전자 통신연구소 수석 연구원  
2008년 9월~현재 광운대학교 전자통신공학과 조교수

구 명 현 (Myung-hyun Koo)



2012년 2월 광운대학교 전자통신공학과 졸업.  
2012년 3월~현재 광운대학교 전자통신공학과 석박통합 과정

신 정 호 (Jeong-ho Shin)



1988년 2월 광운대학교 전기공학과 졸업.  
1992년 2월 광운대학교 전기공학과 석사.  
2007년~현재 경기과학기술대학 메카트로닉스과 겸임 교수.