

# 센서 네트워크 기반의 다수 사용자간 Full-Duplex 음성 통신 시스템을 위한 TDMA/TDD MAC 프로토콜 설계

김지수\*, 이재형\*, 조성호<sup>o</sup>

## A Design of TDMA/TDD MAC Protocol for Full-Duplex Multi-User Voice Communication Systems Based on Sensor Network

Jisoo Kim\*, Jae Hyoung Lee\*, Sung Ho Cho<sup>o</sup>

### 요 약

기존 IEEE 802.15.4는 PHY 계층과 MAC 계층에서의 표준을 제공하며 저전력, 저대역폭, 저속 데이터 통신을 특징으로 한다. 이러한 한계점으로 인하여 IEEE 802.15.4는 센서 검출, 홈 네트워크 등의 제한된 용도로만 쓰였으나 최근 음성과 같은 멀티미디어 데이터를 전송하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 논문에서는 기존 센서 네트워크 기반 Peer-to-Peer 음성 통신의 개선을 통해 다수 사용자간의 음성 통신을 지원하기 위하여 새로운 IEEE 802.15.4 PHY 기반 TDMA/TDD MAC을 설계하고 그룹 통신을 할 수 있는 하드웨어를 개발 하였다. 또한 설계된 시스템의 성능을 평가하기 위하여 실험을 통해 Mean Opinion Score (MOS)를 측정 하였으며 이는 사인파를 사용하는 방법을 이용하여 검증하였고 본 논문에서 제안하는 시스템이 실제 환경에서 다양한 응용 솔루션으로 개발 될 수 있음을 기대하였다.

**Key Words** : Voice over Sensor Networks (VoSN), IEEE 802.15.4, TDMA/TDD, Group Communication.

### ABSTRACT

The IEEE 802.15.4 offers standard about PHY and MAC layer and features low power, low bandwidth, and low speed data communication. Because of this reason, IEEE 802.15.4 is only within a limited range such as sensor detection and home network; nevertheless, the research about transmission multimedia data like voice packet through wireless sensor networks is conducted widely. In this paper, we proposed the group communication system based on the sensor network. TDMA/TDD MAC based on the IEEE 802.15.4 PHY for voice communication on the sensor network is designed by improvement existing peer-to-peer voice communication on the sensor network and hardware is implemented for group communication. To measure the quality of designed system, mean opinion score (MOS) is obtained from the experiment and verified by using sine wave method. As a result of an experiment, we expect that a many cases of application solution can be developed using presented system.

※ 본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음.(NIPA-2012- H0301-12-4003)

• 주저자 : 한양대학교 전자컴퓨터통신공학과 임베디드무선통신연구실, jskim@casp.hanyang.ac.kr, 준회원

o 교신저자 : 한양대학교 전자컴퓨터통신공학과 임베디드무선통신연구실, dragon@hanyang.ac.kr, 정회원

\* 한양대학교 전자컴퓨터통신공학과 임베디드무선통신연구실, jhlee@casp.hanyang.ac.kr, 종신회원  
 논문번호 : KICS2012-09-436, 접수일자 : 2012년 9월 15일, 최종논문접수일자 : 2012년 2월 4일

## I. 서 론

무선 개인 영역 네트워크 (Wireless Personal Area Network: WPAN)란 다수의 노드가 하나의 네트워크를 구성하여 근거리 무선 통신을 수행하는 네트워크를 뜻한다. 이를 위해 IEEE 표준화위원회는 IEEE 802.15.x 표준들을 권고하였다. 이들 가운데 IEEE 802.15.4 표준<sup>[1]</sup>은 저속 WPAN에 관한 것으로서 저전력, 저대역폭, 저비용 및 저속 데이터 통신을 지향하는 기술이다. 이에 따라 IEEE 802.15.4 표준은 대체로 홈 네트워크 및 원격 제어, 재난 관리, 산업 제어 등의 분야에 활용된다. 최근에는 IEEE 802.15.4 기반의 센서 네트워크를 이용하여 대용량 멀티미디어 데이터를 전송하는 연구가 활발히 진행되고 있으며<sup>[2,3]</sup> 보안 감시<sup>[4]</sup>, 탄광 모니터링, 재난관리 등의 음성 전송 응용이 개발 중에 있다. 이러한 센서 네트워크를 이용한 음성통신은 Voice over Sensor Network (VoSN)이라고 명명되어 연구가 진행되고 있다.

이러한 VoSN에 관한 연구는 아직 초기 단계로서, 주로 1:1 음성 통신을 위주로 개발되고 있다. Rahul Mangharam은 센서 네트워크 기반의 FireFly 플랫폼을 이용한 실시간 음성 통신 환경을 구축하여 VoSN을 구현하였고<sup>[2]</sup>, Hu Rong-lin은 센서 네트워크 기반에서 Time Division Duplex (TDD) 방식을 이용한 Full-Duplex 음성 통신을 구현하였다<sup>[5]</sup>. 그렇지만 이들 모두는 하나의 음성 채널이 모든 센서 네트워크의 채널을 점유하여 다수의 사용자를 지원하지 못하는 제약사항이 있었다. 이에 최근 Time Division Multiple Access (TDMA)를 응용하여 IEEE 802.15.4 PHY 기반 TDMA/TDD 방식의 최대 6채널 Full-Duplex Media Access Control (MAC)을 구현하여 다중 일대일 음성 통신을 구현하였다<sup>[6]</sup>. 하지만 이러한 기존의 Peer-to-Peer 음성 통신 방식과는 다르게 센서 네트워크를 이용할 수 있는 보다 다양한 분야에 응용하기 위하여 그룹 통신으로 일컬어질 수 있는 무선 센서 네트워크 기반의 다수 사용자간 Full-Duplex 음성 통신 시스템의 필요성에 제기 되고 있다. 그렇지만 기존에 설계된 IEEE 802.15.4 기반 TDMA/TDD MAC을 비롯하여 Coordinator는 오직 Peer-to-Peer 방식만을 지원하도록 설계 되어 있는 한계점이 있었다.

본 논문에서는 IEEE 802.15.4 MAC을 응용하여 TDMA/TDD MAC 프로토콜을 새로이 설계하였고 이에 맞는 Coordinator를 설계, 제작하여 최대 10채

널의 Full-Duplex 음성 통신을 할 수 있는 시스템을 제안하였다. (그림삭제, 설명 일부 삭제 및 수정) 본 논문에서 제안하는 시스템은 야외 레저 활동, 건설 현장 및 긴급 재난 상황과 같이 그룹 통신을 이용할 수 있는 여러 가지 상황에서 사용 될 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 전반적인 시스템의 구성과 제안 하는 시스템의 구현을 위한 TDMA/TDD MAC과 Coordinator 하드웨어 플랫폼의 구현 과정을 기술 한다. III장에서는 설계한 TDMA/TDD MAC과 Coordinator 하드웨어 플랫폼의 구현 결과와 성능 측정 결과에 대해서 설명한 후 IV장에서 마무리 맺는다.

## II. 본 문

### 2.1. 시스템 구성

본 논문에서 제안하는 시스템은 10대의 Mobile Device와 1대의 Coordinator로 구성된다. 각 Mobile Device Coordinator를 거쳐 통신하게 되고 Coordinator는 각 Mobile Device와의 무선 통신 뿐만 아니라 10개의 채널에서 수신한 음성의 합성을 수행하여 Full-Duplex 그룹 음성 통신을 가능하게 한다. 본 시스템의 구성은 아래의 그림 1과 같다.

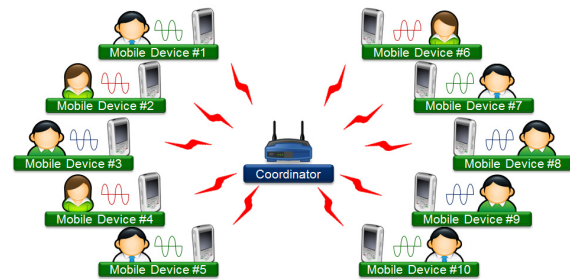


그림 1. 센서 네트워크 기반의 다수 사용자간 Full-Duplex 음성 통신 시스템  
Fig 1. Full-Duplex Multi-User Voice Communication Systems Based on Sensor Network

Mobile Device는 사용자로 하여금 음성 신호를 듣고 말할 수 있도록 하고, Coordinator는 각 Mobile Device와의 IEEE 802.15.4 PHY기반의 무선 통신을 관리하고 음성 합성을 수행하는 역할을 한다. Coordinator에서 합성된 음성 신호는 각각의 Mobile Device에게 동시에 전달되는 과정을 거쳐 각각의 사용자는 본인의 음성뿐만 아니라 같은 Coordinator에 연결된 다른 모든 사용자들의 음성을 듣게 되는 것이다.

또한 각 Mobile Device와 Coordinator 모두 내부에 G.729a 포맷을 지원하는 Speech Codec Chip과 CC2431 Transceiver가 사용되는데, Speech Codec Chip은 아날로그 데이터를 G.729a 포맷을 이용하여 아날로그 음성 신호와 데이터 패킷간의 압축, 변환을 하도록 하고 CC2431 Transceiver는 IEEE 802.15.4 PHY를 이용한 무선 통신을 할 수 있도록 한다. 본 시스템에 관한 자세한 TDMA/TDD MAC과 하드웨어 구조는 아래의 본문에 나타내었다.

### 2.2. TDMA/TDD MAC 설계

본 시스템을 위해 새로이 설계한 IEEE 802.15.4 기반의 TDMA/TDD MAC Frame은 20 Bytes의 음성 패킷 사이즈와 최대 10 명의 사용자를 지원할 수 있다는 두 가지 특징을 갖는다. 제안하는 TDMA/TDD MAC 프로토콜은 매 20 ms 마다 센서 네트워크를 통해 전송이 이뤄지는데 이는 본 시스템에서 사용하는 Speech Codec Chip이 송수신버퍼 각각에 대하여 20 Bytes/20 ms 버퍼링 모드를 지원하기 때문이다. 또한, 본 프로토콜은 Inter-slot Interference를 회피하고 시스템 내부 음성 신호 처리 시간을 보장하기 위하여 각 타임 슬롯 사이마다 프로세싱 타임의 역할을 겸하는 가드 타임 슬롯을 삽입 하였다. 제안하는 TDMA/TDD MAC Frame은 아래의 그림 2와 같다.

20 ms의 길이를 갖는 위의 MAC Frame은 두 개의 Guard-time 슬롯 ( $2 \times 0.22$  ms), 한 개의 Beacon 슬롯 (0.7 ms), 한 개의 Paging 슬롯 (1.1 ms), 열한 개의 Processing Time 슬롯 (0.24 ms),

한 개의 Broadcasting 슬롯 (1.32 ms), 한 개의 Access 슬롯 (1 ms) 그리고 열 개의 Uplink Traffic 슬롯 ( $10 \times 1.32$  ms)으로 구성되어 있으며 각 슬롯들은 데이터의 전송 방향에 따라 크게 Downlink Time 슬롯과 Uplink Time 슬롯으로 구분 지을 수 있다. Guard-time 슬롯은 Inter-slot Interference를 피하기 위하여 삽입된 슬롯이고, Beacon 슬롯의 역할은 Coordinator와 Mobile Device간의 동기화를 위한 슬롯이며 본 시스템에서는 매 20 ms 마다 Beacon 슬롯을 통하여 동기를 맞추게 된다. Paging 슬롯은 Coordinator로부터 각 Mobile Device에 필요한 매개변수 값들은 전달하기 위해 필요하다. 이때 전달되는 매개변수는 각 Mobile Device 내부의 Speech Codec Chip 및 CC2431 Transceiver등의 초기화시에 필요한 값이다. Paging 슬롯 뒤 Processing Time1 동안에는 Coordinator의 MCU로부터 CC2431 Transceiver에게 음성 패킷 데이터가 전달되게 된다. 이때 전달되는 음성 패킷 데이터들은 각 채널에서 들어온 음성 신호들이 합성된 음성신호인데, 이 음성 패킷 데이터들은 Broadcasting 슬롯이 할당된 동안에 Coordinator로부터 각 Mobile Device들에게 모두 동시에 전송 된다. 위의 1번부터 3번 까지 할당된 슬롯들은 Downlink Time 슬롯으로 분류 할 수 있다.

Downlink Time 슬롯과 Uplink Time 슬롯은 두 Time 슬롯 사이에 위치한 Guard-time 슬롯으로 구분 지어지게 된다. Access 슬롯은 각 Mobile Device로부터 Coordinator에게 Call 시도를 걸거나

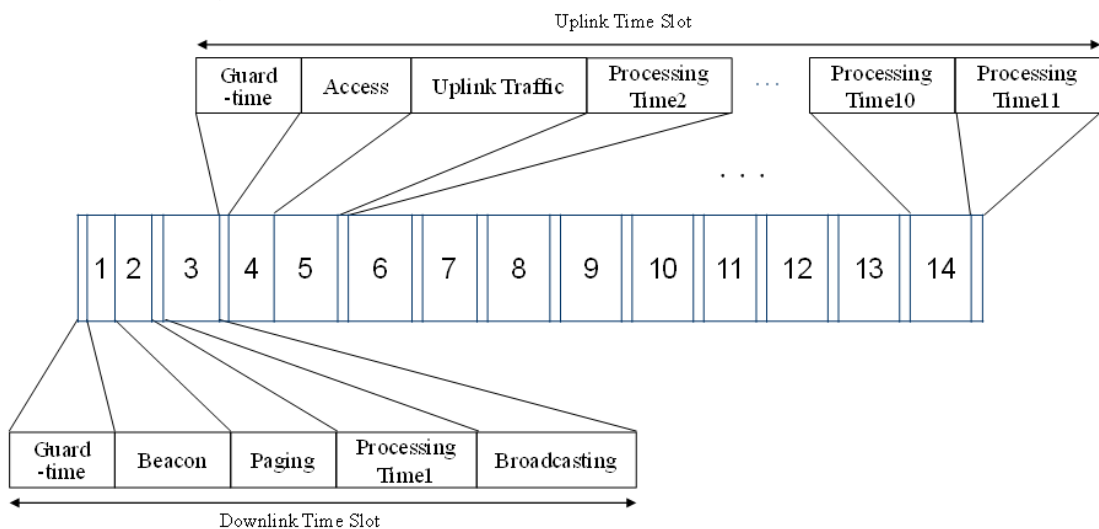


그림 2. 센서 네트워크 기반의 다수 사용자간 Full-Duplex 음성 통신을 위한 MAC Frame 구조  
Fig 2. MAC Protocol for Full-DUplex Multi-User Voice Communication Systems Based on Sensor Network

각종 등록 정보를 전송되는데 사용되게 된다. 이때에 Coordinator로의 등록에 성공한 각 Mobile Device는 각자에게 할당된 Uplink Traffic 채널을 점유하여 Mobile Device로부터 Coordinator로 음성 패킷 데이터를 전달하는데 사용되게 된다. Processing Time 2-11 슬롯은 각 Uplink Traffic 채널간의 간섭을 방지하기 위한 Guard-time 슬롯의 역할과 동시에 MCU에서의 음성 신호처리의 역할을 겸한다.

2.3. 하드웨어 플랫폼 설계

다수 사용자간 Full-Duplex 음성 통신을 구현하기 위하여 본 시스템에서는 최대 10개의 각 Mobile Device로부터 수신되는 G.729a 포맷의 음성 패킷 데이터를 아날로그 신호로 변환한 후, Coordinator 내부에 OP-AMP로 구성되는 가산 증폭 회로를 응용하여 아날로그 음성 신호를 합성하고 다시 G.729a 포맷으로 압축 변환하여 각 Mobile Device 들에게 송신하는 방법을 채택하였다. 이러한 방식은 최대 10명의 사용자간의 그룹 통신을 가능케 할 수 있는 간단하지만 효과적인 방법이다. 본 논문에서 제안하는 시스템을 위해 설계한 Coordinator의 내부 Block Diagram은 아래의 그림 3과 같다.

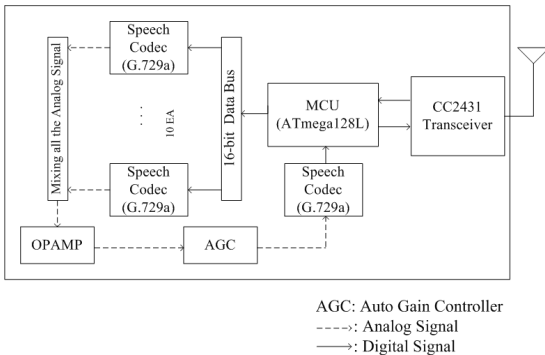


그림 3. 센서 네트워크 기반 다수 사용자간 Full-Duplex 음성 통신을 위한 Coordinator의 Block Diagram  
 Fig 3. The Block Diagram of Coordinator for Full-Duplex Multi-User Voice Communication Systems Based on Sensor Network

Coordinator는 CC2431 Transceiver, G.729a Codec을 지원하는 11개의 Speech Codec Chip [7], OP-AMP와 Auto Gain Controller (AGC) 및 MCU로 이루어져 있다. CC2431 Transceiver는 IEEE 802.15.4 PHY를 이용하여 최대 10대의 Mobile Device들과 20 ms의 주기로 무선으로 음성 패킷 데이터를 송수신하고 MCU와 데이터를 주고받는다.

Speech Codec Chip은 수신한 G.729a 포맷의 음성 패킷 데이터를 아날로그 음성신호로 변환 및 압축해제를 하며 그 반대로 아날로그 음성 신호를 받아 G.729a 포맷의 음성 패킷 데이터로 압축과 변환을 수행할 수 있다. 위의 Coordinator에서 10개의 Speech Codec Chip은 MCU로부터 전달받은 G.729a 포맷의 음성 패킷데이터를 OP-AMP로 구성된 가산 증폭 회로를 이용하여 음성 합성을 수행하기 위해 아날로그 신호를 변환하여 전달하고, 나머지 1개의 Speech Codec Chip은 합성된 아날로그 음성 신호를 모든 Mobile Device에게 Broadcasting 할 수 있도록 다시 G.729a의 포맷으로 압축 변환한다. 각 Speech Codec Chip은 모두 20 ms의 주기로 디지털 데이터와 아날로그 신호간의 변환이 이루어진다. OP-AMP를 통해 아날로그 신호의 합성을 수행할 때에는 몇 개의 채널에서 음성 신호가 들어왔느냐에 따라 그 Gain이 일정치 않을 수 있는데, AGC는 합성되는 음성 신호의 수에 상관없이 합성된 아날로그 음성 신호의 Gain값을 일정하게 유지시켜주는 역할을 한다.

본 시스템에서의 MCU는 ATmega128L을 사용하였다. MCU는 CC2431 Transceiver로부터 최대 10 채널의 G.729a 음성 패킷 데이터를 수신하고 할당된 채널에 맞는 Speech Codec Chip으로 음성 패킷 데이터를 전달하여 변환이 이루어지도록 하며, 합성된 음성 데이터 패킷이 각 Mobile Device들에게 Broadcasting이 될 수 있도록 CC2431 Transceiver에게 전달하는 등 본 시스템의 전반적인 제어를 담당한다.

MCU를 선정하는데 있어서는 다음과 같은 사항들이 고려되었다. 첫째로, TDMA/TDD MAC에서 설계한 20 ms의 Time 슬롯 내에 최대 10 채널로부터 수신되는 G.729a 음성 패킷 데이터의 신호 처리 가능 여부이다. MCU의 처리 시간은 TDMA/TDD MAC의 채널 할당량을 좌우하기 때문에 목표로 하는 최대 10 채널을 할당하기 위해서는 위에서 설계한 MAC의 Time 슬롯을 만족 할 수 있어야 한다. 둘째로, CC2431 Transceiver 및 Speech Codec Chip간의 인터페이스 문제이다. CC2431 Transceiver와 11개에 달하는 Speech Codec Chip은 모두 20 ms 주기의 인터럽트를 이용하여 데이터를 전달하는 방법으로 동작하기 때문에 데이터의 처리 및 전달의 역할을 하는 MCU는 인터럽트 핸들링과 데이터 처리속도에 문제가 없어야 한다. 위의 두 가지 사항을 고려하여 MCU를 선

정하였고 실제 개발한 Coordinator 플랫폼은 아래의 그림 4와 같다.



그림 4. 개발된 센서 네트워크 기반의 다수 사용자간 Full-Duplex 음성 통신을 위한 Coordinator  
Fig 4. The Developed Coordinator for Full-DUPlex Multi-User Voice Communication Systems Based on Sensor Network

위의 Coordinator를 통하여 Full-Duplex 그룹 통신이 이루어지는 프로세스는 다음과 같다. 첫째로, 각 Mobile Device들은 Coordinator에 Registration Request 신호를 보내어 Mobile Device의 등록 정보가 등록이 되어야 한다. 등록 과정이 완료된 후, 각 Mobile Device들은 CC2431 Transceiver과 음성 패킷 데이터를 송신한다. 둘째로, CC2431 Transceiver는 MCU에게 수신한 음성 패킷 데이터를 넘겨주고 MCU는 10개의 채널 중 각 채널에 할당된 Speech Codec으로 음성 패킷 데이터를 구분하여 전달하게 된다. 이때 MCU는 16-bit Data Bus를 구성하여 Speech Codec으로 음성 패킷 데이터를 전달한다. 셋째로, 각 채널에 맞는 음성 패킷 데이터를 수신한 다수의 Speech Codec Chip들은 G.729a 알고리즘을 수행하여 아날로그 음성 신호를 OP-AMP에게 전달하게 된다. 넷째로, OP-AMP에서는 최대 10 채널에서 들어온 아날로그 음성 신호들의 혼합을 통해 하나의 음성 신호로 변환하고 AGC에서는 합성된 아날로그 신호의 Gain을 일정히 맞추어 주어 다시 Speech Codec Chip으로 전달하게 된다. 마지막으로, Speech Codec Chip은 아날로그 음성 신호의 압축과 변환을 통해 음성 패킷 데이터

를 만들어 MCU에게 전달을 하여 CC2431 Transceiver에게 합성된 음성 패킷 데이터를 보낸다. CC2431 Transceiver는 다시 모든 Mobile Device에게 송신을 하게 되어 그룹 통신을 이룬다. 앞서 기술한 일련의 과정은 모두 20ms의 주기로 반복되어 실시간성을 갖도록 한다.

### III. 실험

본 논문에서 설계한 시스템의 성능을 평가하기 위하여 설계한 Coordinator와 Mobile Device간의 직접적인 음성 통신을 수행하였다. 음성 전송 지연과 통화자의 주관적인 음질평가 방법인 Mean Opinion Score (MOS)를 측정하고 시인파를 이용하여 측정된 MOS를 증명하는 실험이 수행되었으며 실험을 수행한 환경은 아래의 그림 5와 같다.

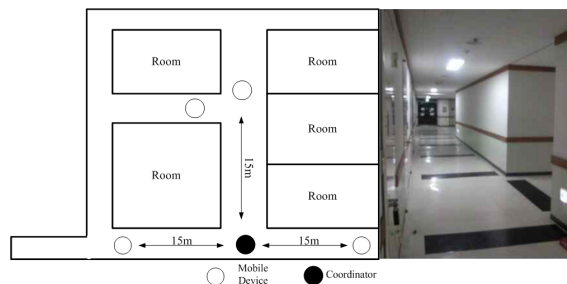


그림 5. 실험 수행 환경  
Fig 5. The Test Environment

실험은 약 15m 반경의 조용한 실내복도에서 진행되었으며 실험에서는 1명의 사용자에서부터 최대 10명의 사용자까지 일정 간격을 두어 증가 시켜가며 측정을 반복하는 방식으로 진행되었다. Coordinator의 위치는 실험 환경 정 중앙에 고정되어 움직이지 않았으며 각 Mobile Device는 약 15m 반경을 유지하되 위치는 다르게 하도록 하였다.

Mobile Device에서 음성 신호를 보내어 음성 합성이 이루어지고 합성된 음성 패킷 데이터가 다시 되돌아오는데 걸리는 시간을 계산하기 위하여 서로 다른 Mobile Device에서 아날로그 음성이 통과하는 오실로스코프를 이용하여 확인하는 방식을 택했다. 실험 결과는 아래의 그림 6에서 볼 수 있듯이 Mobile Device간 음성 전송 지연이 약 100 ms임을 확인하였다.

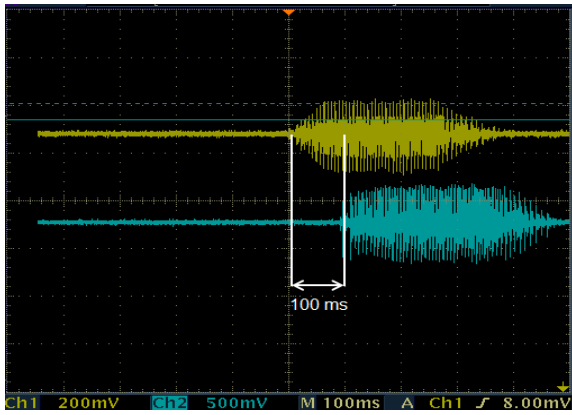


그림 6. 음성 전송 지연 측정 그래프  
Fig 6. The Graph of Voice Packet Delay Measurement

이는 기존 Voice over Internet Protocol (VoIP)의 측정 결과와 비교하여 뒤떨어지지 않는 수준 이었으며, 실제 음성 통신을 하는데 있어서도 문제가 발생하지 않는 수준이었다. 또한 VoIP에서 음성 성능의 주관적 의견을 점수화하여 음성 품질을 측정하는 척도인 MoS를 측정하는 것과 마찬가지로 본 시스템에서도 사용자가 늘어날수록 변화하는 MoS를 측정하였다. Coordinator를 이용하여 Mobile Device간에 호 시도를 통해 그룹 통신을 수행한 통화 품질 측정결과는 다음 그림 7과 같다.

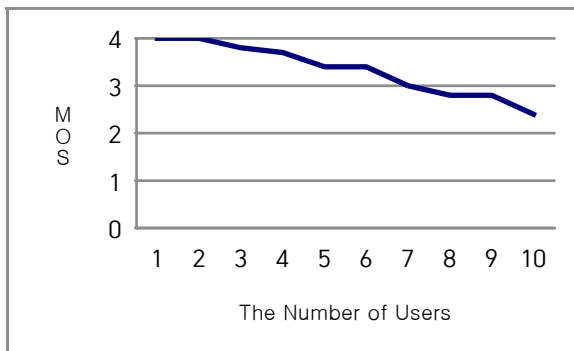


그림 7. 사용자 수에 따른 MOS 측정 결과  
Fig 7. The Result of MOS Test According to the Number of Users

Coordinator에 호 시도를 하는 사용자가 많아짐에 따라 MOS는 대체로 감소하는 경향을 보임을 알 수 있었다. 일반 이동통신의 음질이 MOS 4 정도이고, 음성 통신이 가능한 수준은 3.6이상, 음성 통신이 제한적으로 가능한 수준은 3.1이상임을 고려하였을 때 약 6, 7명의 사용자까지 본 시스템의 성능은 신뢰 할 수 있는 수준임을 보였고, 실제 음성 통신에도 6, 7명까지는 원활하게 서로의 음성을 확인 하였다. 사용자

수가 늘어날수록 음질 성능이 감소하는 이유는 그룹 통신을 위해 음성 합성이 이루어질 때, 사용자가 많아질수록 합성되는 음성뿐만 아니라 잡음 역시 마찬가지로 더 합성되기 때문임을 예상할 수 있었다. 또한 본 방법은 주관적 음질 평가이기 때문에 VoSN 시스템에서 사용자가 많아질수록 음성이 떨어지는 정도를 수치적으로 측정하기 위해서 단말기에서 음성 대신 사인파를 보내 되돌아오는 사인파의 위상을 비교하는 방법을 제안 하였는데 그 과정은 다음과 같다.

첫째로, 하나의 Mobile Device는 미리 생성해 놓은 8개 샘플로 구성되며 0 - 255의 위상을 갖는 음성 주파수 대역의 10 kHz 사인파 (Template Sample)를 Coordinator로 송신한다. 둘째로, Template Sample을 수신한 Coordinator는 Loop-back 프로세스를 수행하는데 Loop-back 프로세스는 수신한 Template Sample을 OP-AMP와 Speech Codec Chip을 이용한 음성 합성 과정을 거쳐 재 수신하는 과정이다. 셋째로, 재 수신된 연속된 Sample과 기존의 8개의 샘플로 구성된 한 주기의 Template Sample간의 Cross Correlation을 통해 마찬가지로 8개의 샘플로 구성된 한 주기의 Feedback Sample을 결정한다. 실제 Template Sample과 Feedback Sample은 아래의 그림 8과 같다.

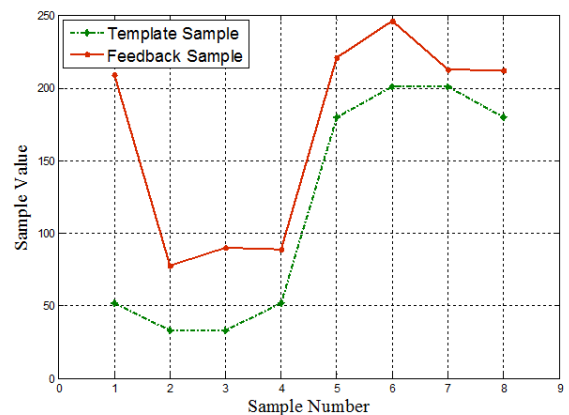


그림 8. Template Sample과 Feedback Sample을 이용한 품질 측정  
Fig 8. The Quality Measurement using Template Sample and Feedback Sample

그림 8의 Feedback Sample의 결과는 1명의 사용자인 경우이며 실제로는 10명의 사용자의 경우까지 총 10개의 결과를 얻었다. 10개의 결과에 대하여 신호 왜곡의 정도를 수치화하기 위한 평균 절

대치 오차 (Mean Absolute Error)값은 다음의 수식 (1)을 사용하여 얻었다.

$$MAE = \frac{1}{P} \sum_{i=1}^P |t_i - f_i| \quad (1)$$

위 수식에서  $P$ 는 각 샘플을 구성하는 데이터의 개수,  $t_i$ 는 Template Sample의 위상 값이며  $f_i$ 는 Feedback Sample의 위상 값을 나타낸다. 위의 평균 절대치 오차 값은 각각의 경우에 대하여 각 20번씩 반복하여 계산 하였다. 아래의 그림 9는 Coordinator를 이용하여 그룹 통신을 하는 사용자 수를 증가시켜감에 따라 20개의 평균 절대치 오차 값의 평균을 계산하여 그래프로 나타낸 것이다.

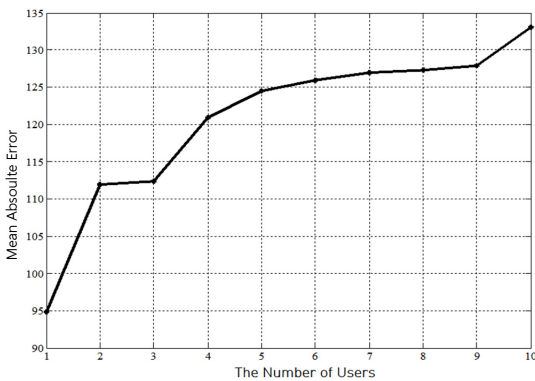


그림 9. 사용자 수에 따른 평균 절대치 오차 값  
Fig 9. The MAE Values According to the Number of Users

그래프는 사용자 수가 늘어남에 따라 증가하는 추세를 보였다. 한명의 사용자의 경우 평균 절대치 오차 값은 95정도에 그쳤으나 사용자 1 명이 추가로 늘어남과 동시에 굉장히 가파른 추세로 평균 절대치 오차 값이 증가하여 약 113까지 증가하였다. 이는 음성이 합성 되는 과정에서 잡음뿐만이 아니라 다른 사용자의 음성 역시 합성이 되므로 원래의 음성 신호는 다른 채널로부터 들어오는 음성 신호에 의해 손상됨을 나타낸다고 볼 수 있다. 그렇지만 앞서 MOS를 측정하였을 경우와 마찬가지로 사용자 수가 6, 7명까지는 어려움 없이 서로의 음성을 확인 할 수 있었다. 이로써 앞서 MOS와 비교 하여 평균 절대치 오차 값 약 125 이하의 환경에서는 센서 네트워크 기반의 음성 통신의 품질은 신뢰가 가능함을 보였고 사인파를 이용한 평균 절대치 오차 값을 구하는 방법을 VoSN 시스템의 품질 평가의

하나의 지표로 제시하였다.

#### IV. 결 론

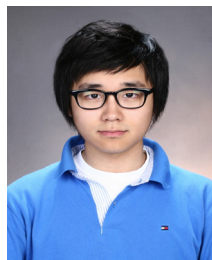
본 논문에서는 기존의 센서 네트워크 기반의 음성 통신의 한계점인 일대일 통신 방식을 극복하고 보다 많은 응용 솔루션을 기대할 수 있는 센서 네트워크 기반의 다수 사용자간 Full-Duplex 음성 통신을 위한 시스템을 설계하고 구현하였다. 본 시스템을 구현하기 위하여 IEEE 802.15.4 PHY기반의 TDMA/TDD MAC 프로토콜을 새로이 설계하였고, 음성 합성과 음성 패킷 데이터의 신호 처리를 담당하는 Coordinator를 실제로 구현하여 최대 10 명의 사용자로 하여금 그룹 통신이 가능하게끔 하였다. 설계한 시스템의 성능을 검증하기 위하여 MOS를 측정하였고 사인파를 이용하여 평균 절대치 오차 값을 구해 VoSN의 품질 평가를 완료하였다. 성능 측정 결과 본 시스템을 이용하여 최대 10 명의 사용자까지 음성 통신이 가능함은 증명 하였으나 사용자가 많아짐에 따라 잡음의 합성 및 각 음성간의 간섭으로 인하여 음성 품질이 다소 감소함을 확인 하였다. 그렇지만 개발한 Coordinator는 잡음 제거 필터 및 보다 효율적인 신호처리 알고리즘을 추가 하여 음성 품질이 더욱 향상될 수 있다. 또한 다수 사용자간의 Full-Duplex 음성 통신 시스템은 재난 상황 시 구조 요원들 간의 근거리 음성 통신 및 산악 활동 등의 제한된 범위 내에서 다수간의 의사소통이 이루어져야 하는 상황에서 여러 가지 솔루션으로 응용될 수 있음을 기대할 수 있다.

#### References

- [1] IEEE, Part 15.4: “Wireless medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specification for low-rate wireless personal area networks (WPANS),” IEEE Standard 802.15.4a. 2007.
- [2] R. Mangharam, A. Rowe, R. Rajkumar, and R. Suzuki, “Voice over sensor networks,” *IEEE RTSS*, Dec. 2006.
- [3] Zigbee Alliance Web Site, “ZigBee/IEEE 802.15.4 Summary,” Retrived September 10, 2004. [Online] Available: <http://www.zigbee.org>.
- [4] B. Latre, P. D. Mil, I. Moerman, B. Dhoedt,

- P. Demeester, and N. V. Dierdonck, "Throughput and delay analysis of unslotted IEEE 802.15.4," *J. Networks*, vol. 1, no. 1, pp. 20-28, May. 2006.
- [5] R. L. Hu, J.R. Yin, X.J. Gu, X.P. Gu, L.Q. Chen, "The research and design on TDD voice WSN," *Multimedia Technology (ICMT)*, 2010 International Conference, Ningbo, China, Oct. 2010.
- [6] J.S. Woo, J.H. Lee, J.H. Yoo, and S.H. Cho, "A study on the MAC for voice communication based sensor network," 2011 KICS (Korea Information and Communications Society) Conference (Fall), SeoKang University, Seoul, Nov. 2011.
- [7] OKI Semiconductor, "ML7204-001 datasheets," Retrived August 12 2004. [Online] Available: <http://www.oki.com>,

김 지 수 (Jisoo Kim)



2011년 2월 한양대학교 미디어통신공학과 졸업  
2011년 3월~현재 한양대학교 전자통신컴퓨터공학과 석사과정  
<관심분야> 전자공학, 신호처리, USN

이 재 형 (Jae Hyoung Lee)



1989년 2월 인하대학교 전자공학과 학사  
1994년 2월 한양대학교 전자공학과 석사  
2010년 8월~현재 한양대학교 전자통신컴퓨터공학과 박사과정

<관심분야> 무선통신, USN, IOT

조 성 호 (Sung Ho Cho)



1982년 2월 한양대학교 전자공학과 학사  
1984년 12월 University of Iowa 컴퓨터공학과 석사  
1989년 8월 University of Utah 컴퓨터공학과 박사  
1989년 8월~1992년 8월 한국

전자통신연구원(ETRI) 선임연구원  
1992년 3월~현재 한양대학교 융합전자공학부교수  
<관심분야> 무선통신, UWB, RFID, WSN, DSP/FPGA Application