

# 자기장 통신을 위한 매체 접근 제어 프로토콜의 성능 분석

정희원 정의훈\*, 원윤재\*\*, 김선희\*\*, 임승옥\*\*, 방영철\*

## Performance Analysis of a Media Access Control Protocol for Magnetic Field Communication

EuiHoon Jeong\*, YunJae Won\*\*, SunHee Kim\*\*, SeungOk Lim\*\*,  
Young-Cheol Bang\* *Regular Members*

### 요약

무선 센서 네트워크 기술이 환경 감시나 재난 감시와 같은 다양한 응용 분야에 적용되면서 지중 환경에서의 무선 통신에 대한 필요성이 증가하고 있다. 특히, 지중에서는 기존의 전자기파를 이용한 무선 통신 방식이 비효율적이기 때문에 그 대안으로서 자기장을 이용한 지중 통신 기술이 제시되었고, 최근 들어 자기장 통신 기술이 국내 KS 규격으로 제정되었다. 본 논문에서는 KS 규격으로 제정된 자기장 통신 매체 접근 제어(Media Access Control) 프로토콜의 성능을 분석 및 시뮬레이션 방법을 통해서 분석한다.

**Key Words :** MAC protocol, magnetic field communication, wireless sensor network

### ABSTRACT

As wireless sensor networks are applied to various applications such as environment monitoring and disaster sensing system, there are increased needs for wireless communication in underground environment. Since the previous wireless communication technology using electromagnetic wave is not appropriate for the underground environment, a new alternative is required. Recently a magnetic field communication technology has been proposed and standardized as a domestic KS standard. In this paper, we analyze the media access control protocol of the KS standard by an analysis and a simulation study.

### 1. 서론

최근 들어, 자연 재해 감시나 토양 오염과 같은 환경 오염 감시 등의 다양한 응용 분야에 무선 센서 네트워크 기술이 적용되고 있다<sup>1)</sup>. 대표적인 무선 센서 네트워크 기술로서 IEEE 802.15.4가 있지만 지중과 같은 열악한 무선 통신 환경에서는 일정 수준 이상의

안정적인 통신 성능을 보여주지 못한다<sup>1-3)</sup>. 지중에서 전자기파를 이용한 통신 방식은 심한 신호 감쇄와 채널 특성의 동적인 변화, 큰 안테나 크기 등과 같은 문제점들을 가진다. 지중에 포함된 수분과 토양의 다양한 구성 입자들 때문에 심한 신호 감쇄 현상이 발생하고, 통신 공간 내의 토양 성분의 차이로 인해 채널 특성이 동적으로 변하게 된다. 또한 전송 거리 확장을

\* 본 연구는 지식경제부 및 한국산업기술평가관리원의 산업원천기술개발사업의 일환으로 수행하였음. [10033359, 매립형 자기장 통신 기술 개발]

\* 한국산업기술대학교 컴퓨터공학과(ehjeong@kpu.ac.kr, ybang@kpu.ac.kr),

\*\* 전자부품연구원 무선네트워크 연구센터(yjwon@keti.re.kr, elecsunny@keti.re.kr, solim@keti.re.kr)

논문번호 : KICS2011-01-020, 접수일자 : 2011년 1월 7일, 최종논문접수일자 : 2011년 5월 20일

위해 낮은 대역의 주파수를 사용할 경우 안테나의 크기가 문제가 된다<sup>11</sup>.

최근 들어, 지중 통신에서 전자기파를 이용하는 통신 기술의 대안으로서 자기장을 이용한 통신 기술에 대해서 관심이 모아지고 있다. 지중에서 자기장을 이용하여 통신할 경우에는 수분이나 토양 구성 물질에 따른 채널 특성의 변화가 거의 없으며 비교적 작은 크기의 안테나를 통해서 통신이 가능한 장점이 있다<sup>14</sup>. 자기장 통신과 관련한 연구들은 주로 지중 채널 환경을 모델링하고 분석하는 연구들<sup>11,4,8</sup>과 자기장 통신 시스템의 성능을 이론적으로 분석한 연구들이<sup>9,10</sup> 대부분이다. 반면에, 자기장을 이용한 지중 통신 시스템의 구체적인 개발과 관련된 연구는 최근에 국내에서 활발히 이루어지고 있다<sup>5,7</sup>.

국내에서 개발 중인 자기장을 이용한 통신 시스템과 관련된 기술들은 국내 KS 규격으로 제정되었다<sup>11,12</sup>. 해당 기술의 국내 표준화 과정을 살펴보면, 자기장 통신과 관련한 물리 계층 요구 사항과 매체 접근 제어 계층 요구 사항에 대해서 포럼의 표준 개발이 2009년 1월에 이루어졌다. 그리고 같은 해 3월에 KS 표준에 공시되었고 12월에 KS 규격으로 제정되었다. 또한 자기장 통신과 관련된 국제 표준화 작업도 현재 진행 중이며, 2009년 6월에 ISO/IEC JTC1 SC6 WG(working group) 1에 Magnetic Field Area Network라는 제목으로 NP(new work item proposal)가 제안되었고 같은 해 12월에 국제 표준 NP로 채택 되었다. 현재 WG1 내에 회원국들과 자기장 통신관련 WD(working draft)가 진행 중에 있다<sup>3</sup>.

본 논문에서는 KS 규격으로 제정된 자기장 통신 매체 접근 제어 프로토콜의 성능을 분석과 시뮬레이션 방법을 통해 분석한다. 성능을 평가하는 척도로서 평균 패킷 전송 지연 시간과 네트워크 합류 완료 시간을 사용하고 각 성능 척도에 대해서 기존의 IEEE 802.15.4 매체 접근 제어 프로토콜의 성능과 비교한다. 특히 네트워크 합류 완료 시간에 대해서는 분석 방법을 통해서 결과를 도출하고 이를 시뮬레이션 결과와 비교하여 검증 한다. 시뮬레이션은 쉘넷(qualnet)을 이용한다. 본 논문의 구성은 2장에서 자기장 통신 매체 접근 제어 프로토콜에 대해서 구체적으로 설명하고 3장에서는 분석 및 시뮬레이션 방법을 통한 성능 분석 결과를 보여주며, 마지막으로 4장에서는 결론을 맺는다.

## II. 자기장 통신 매체 접근 제어 프로토콜

본 장에서는 KS 규격으로 제정된 자기장 통신 매

체 접근 제어 프로토콜의 특성과 세부 내용에 대해서 설명한다.

### 2.1 자기장 통신 매체 접근 제어 프로토콜의 특성

자기장 통신 매체 접근 제어 프로토콜<sup>12</sup>은 지중 환경에서 효율적인 무선 통신을 하기 위한 것이므로 지중 환경에서의 특성과 자기장을 이용할 때의 특성을 모두 고려하고 있다. 프로토콜의 특성을 정리하면 다음과 같다.

#### • 예약 기반의 채널 접근 방식

지중에 매립된 노드들은 배터리를 사용하여 동작하므로 자기장 통신 매체 접근 제어 프로토콜은 전력 소모를 최소화 해야 한다. 일반적으로 경쟁 기반의 채널 접근 방식은 과도한 패킷들 간의 충돌이 발생할 경우, 패킷의 재전송으로 인해 전력 소모가 증가할 수 있다. 패킷들 간의 충돌을 줄이기 위해서 자기장 통신 매체 접근 제어 프로토콜은 슬롯(slot)을 예약하고 예약된 슬롯을 이용하여 패킷을 전송하는 방식으로 채널을 접근 한다.

#### • 동적인 슈퍼 프레임 구성

슈퍼 프레임(super-frame) 내에 슬롯의 크기가 고정된 경우, 전송할 패킷의 크기가 변화 함에 따라서 채널이 낭비되는 현상이 발생한다. 이를 보완하기 위해서 일정한 신호 절차를 통해서 슬롯의 크기를 조정할 경우에는 추가적인 신호 절차로 인해 전력 소모가 증가하게 된다. 자기장 통신 매체 접근 제어 프로토콜에서는 추가적인 신호 절차 없이 패킷 크기에 따라 슬롯의 크기가 변하도록 지원한다. 이는 슈퍼 프레임 내에서 슬롯의 경계를 전송한 패킷에 대한 수신 확인 패킷(acknowledgement)을 통해서 구분하도록 함으로써 가능하다. 슈퍼 프레임의 동적인 구성을 통해서 전송 지연 시간이 감소하는 효과가 있다.

#### • 간결한 신호 절차

지중에서 자기장을 이용한 무선 통신을 통해 신호의 감쇄 현상을 개선하더라도, 전송 거리는 수 미터 정도로 제한되는 것이 일반적이다. 노드 간 통신 거리가 짧기 때문에 네트워크 구성이 단순하고, 이를 기반으로 노드간 간결한 신호 절차가 가능하다. 이러한 점을 고려하여 자기장 통신 매체 접근 제어 프로토콜의 네트워크 합류 절차는 간결하며 네트워크 합류 과정 중에 슈퍼 프레임 내의 슬롯에 대한 예약이 동시에 이루어진다.

• 절전 모드 동작

패킷을 전송한 노드들은 패킷 전송 이 후에는 항상 다음 슈퍼 프레임이 시작되기 전까지 절전 모드(sleep mode)로 동작하도록 하여 전력 소모를 줄인다.

2.2 네트워크 구성

그림 1은 자기장 통신 네트워크(Magnetic Field Area Network; MFAN)를 구성하는 예를 보여주고 있다. MFAN을 구성하는 노드들은 크게 코디네이터(coordinator) 역할을 수행하는 MFAN-C (Magnetic Field Area Network Coordinator) 노드와 일반 노드인 MFAN-N(Magnetic Field Area Network Node) 노드로 구분된다. 모든 노드는 MFAN-C와 MFAN-N의 역할을 수행할 수 있다. MFAN-C 노드는 MFAN 내에 오직 하나만 존재하게 되고, 일반적으로 MFAN-N 노드들로부터 데이터를 수집하는 역할을 수행하는 노드가 MFAN-C 노드가 된다. MFAN-C 노드는 통신을 위한 프레임(frame)을 구성하고 MFAN-N 노드들의 MFAN 합류와 분리, 해제 등의 동작을 관리하는 역할을 수행한다. MFAN-N 노드는 MFAN 내에서 MFAN-C 노드를 제외한 노드들로서 한 MFAN 내에 최대 65,519개 존재할 수 있으며, MFAN-C 노드가 보내는 요청 패킷(request packet)에 대한 응답 패킷(response packet)을 전송할 수 있다. MFAN 내에서는 하나의 채널만을 사용할 수 있으므로 하나의 네트워크만이 존재할 수 있다.

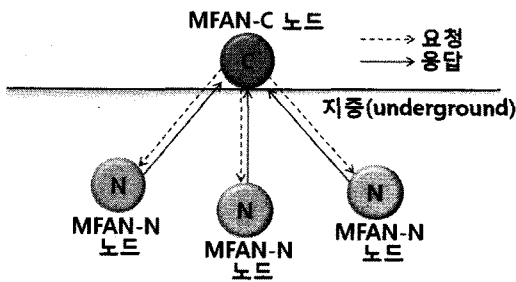


그림 1. MFAN 네트워크 구성

2.3 슈퍼 프레임 구조

MFAN-C 노드와 MFAN-N 노드들 간에 통신을 위한 슈퍼 프레임(super-frame) 구조는 그림 2와 같다. 슈퍼 프레임은 요청 구간(request period)과 응답 구간(response period), 비활성 구간(inactive period)으로 나누어지고 응답 구간은 다시 여러 개의 시간 슬롯(time slot)으로 나누어진다. 요청 구간과 응답 구간, 비활성 구간 및 응답 구간 내의 시간 슬롯들의 크기는

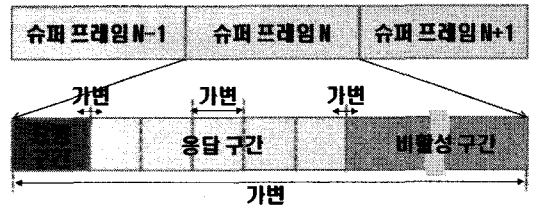


그림 2. MFAN 슈퍼 프레임 구조

모두 가변이다. 슈퍼 프레임은 MFAN-C 노드가 요청 구간에서 요청 패킷을 전송함으로써 시작된다.

요청 구간에서는 MFAN-C가 MFAN-N 노드들로부터 데이터 또는 여러 가지 네트워크 구성에 필요한 제어 정보를 요청하기 위해서 요청 패킷을 전송한다. MFAN-N 노드가 MFAN에 합류되기 전에는 응답 구간에서 경쟁(contention) 방식을 통해서 응답 패킷을 전송하게 된다. 하지만 MFAN-N 노드가 MFAN에 합류된 이 후에는 요청 패킷에 응답 구간 동안에 응답 패킷을 전송할 수 있는 MFAN-N 노드들에 대한 정보를 포함할 수 있고 해당 MFAN-N 노드들은 응답 구간에서 할당된 시간 슬롯을 통해 요청된 응답 패킷을 경쟁 없이 전송할 수 있다. 비활성 구간은 현재의 슈퍼 프레임 내에서 패킷을 전송해야 하는 MFAN-N 노드가 존재하지 않는 경우에 시작되고 새로운 요청 패킷이 전송되기 직전까지 지속된다. 비활성 구간 동안에 MFAN-N 노드는 MFAN-C 노드의 요청이 없어도 데이터를 전송할 수 있다.

2.4 프로토콜 동작의 예

MFAN-C 노드는 슈퍼 프레임의 요청 구간 내에서 MFAN-N 노드들에 대해서 합류와 분리, 데이터 전송, 합류 상태 요청, 그룹 주소 설정 등의 네트워크 관리와 관련된 요청 동작들을 수행한다. 그 중에서 그림 3은 네트워크 합류 과정의 예를 보여주고 있다. MFAN-C 노드는 MFAN에 합류를 원하는 MFAN-N 노드들을 수용하기 위해서 합류 요청 패킷을 요청 구간 중에 전송한다. 합류 요청 패킷을 수신했을 때 MFAN에 합류를 원하는 MFAN-N 들은 응답 구간의 시간 슬롯마다 MFAN에 합류를 요구하는 합류 응답 패킷을 경쟁 전송 방식으로 전송한다. 합류 응답 패킷이 MFAN-C 노드에 성공적으로 수신되고 MFAN 합류가 수락된 경우에는 합류를 요청한 MFAN-N 노드를 위한 시간 슬롯이 응답 구간 내에 할당된다. 그리고 MFAN 합류 성공을 알리는 합류 응답 수신확인(acknowledgement) 패킷이 합류에 성공한 MFAN-N 노드의 주소를 포함하여 전달된다.

그림 3에서는 응답 구간의 첫 번째 시간 슬롯에서 우연히 1번과 2번 MFAN-N 노드가 동시에 합류 응답 패킷을 전송하여 충돌(collision)이 발생한 경우를 보여준다. 충돌이 발생한 경우에는 합류 응답 수신확인 패킷 내에 충돌과 관련된 MFAN-N 노드들의 주소가 포함되어 있지 않기 때문에 1번과 2번 MFAN-N 노드들은 다음 시간 슬롯에서 합류 응답 패킷을 다시 전송하려는 시도를 합류에 성공할 때까지 하게 된다. 규격에서는 합류 응답 패킷을 전송하는 데에 사용하는 경쟁 전송 방식에 대해서는 명시적으로 규정하지 않기 때문에 본 논문에서는 전송 확률(transmission probability) 값을 가지는 S-ALOHA(slotted ALOHA) 방식을 합류 응답 패킷을 위한 전송 방식으로 가정하고 트래픽 상황에 따른 최적의 전송 확률 값을 분석 및 시뮬레이션을 통해서 분석 한다. 그림 3에서는 2 번째와 3 번째 시간 슬롯에서 각각 2번 MFAN-N 노드와 1번 MFAN-N 노드가 합류 응답 패킷 전송에 성공하는 경우를 보여준다.

그림 4는 데이터 요청 과정의 예를 보여 준다. MFAN 합류에 성공한 MFAN-N 노드는 발생한 데이터 패킷을 전송하기 위해서 먼저 MFAN-C 노드가 데이터 전송을 요청하는 요청 패킷을 요청 구간에서 전송할 때까지 기다린다. 요청 구간에서 데이터 요청 패킷을 수신한 MFAN-N 노드는 데이터 요청 패킷 내에 포함된 자신의 노드 주소와 자신에게 할당된 시간 슬롯 번호를 확인하고 응답 구간 중에 자신에게 할당된 시간 슬롯 내에서 데이터 패킷을 전송한다. 전송한 데이터 패킷에 대한 성공적인 데이터 응답 수신확인 패킷을 수신하지 못한 경우에는 매 시간 슬롯마다 계속해서 데이터 응답 패킷을 전송하게 된다. MFAN-N 노드는 성공적인 데이터 응답 수신확인 패킷을 수신함으로써 데이터 패킷 전송을 완료한다.

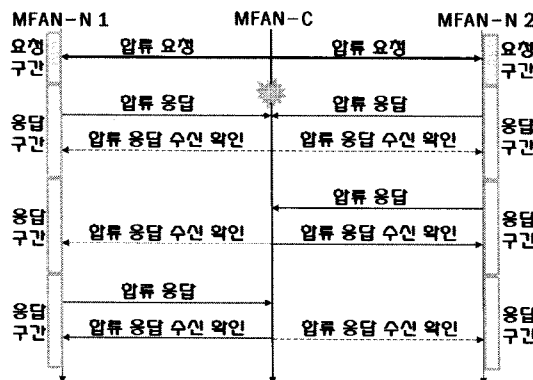


그림 3. MFAN 합류 과정의 예

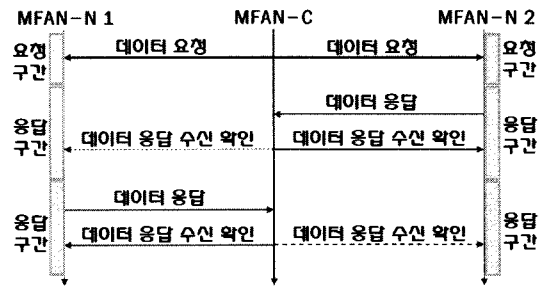


그림 4. 데이터 요청 과정의 예

### III. 성능 분석

본 장에서는 분석(analysis) 방법과 쉘넷(qualnet)을 이용한 시뮬레이션(simulation) 방법을 이용하여 자기장 통신 매체 접근 제어 프로토콜의 성능을 분석한다.

#### 3.1 시뮬레이션 환경 및 시스템 파라미터

그림 5는 시뮬레이션 및 분석을 위한 MFAN 구성의 예를 보여준다.

그림 5에서 1번 노드가 MFAN-C 노드에 해당하고 나머지 노드들은 모두 MFAN-N 노드에 해당한다. 각 MFAN-N 노드로부터 MFAN-C노드로의 화살표는 그 방향으로 CBR 트래픽이 설정되어 있음을 알리는 쉘넷 시뮬레이션 환경에서의 표시이다. MFAN 구성에서 MFAN-N 노드의 수를 변화시킬 때에는 그림 5에 나타난 기본적인 MFAN 구성에서 MFAN-N 노드 수를 다르게 하고 모든 MFAN-N 노드로부터 MFAN-C 노드로의 CBR 트래픽을 설정한다.

표 1은 분석과 시뮬레이션을 위한 시스템 파라미터들을 정리한 것이다. MFAN을 구성하는 총 노드 수(n)는 각각 6, 8, 10, 12인 경우에 대해서 분석 및 시뮬레이션을 수행하였다. MFAN은 1개의 MFAN-C 노드와 (n-1)개의 MFAN-N 노드들로 구성된다. 모든 MFAN-N 노드들은 CBR 트래픽을 발생하고 발생된 트래픽은 MFAN-C 노드로 전달되는

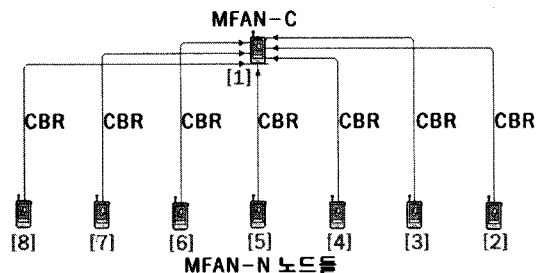


그림 5. 시뮬레이션을 위한 MFAN 구성의 예 (MFAN-N 노드 수가 7인 경우)

표 1. 시스템 파라미터

파라미터	설정 값
노드 수	n = 6, 8, 10, 12
노드 구성	MFAN-C 노드: 1개, MFAN-N 노드: n-1개
트래픽	CBR (32바이트/패킷, Start:40초, End:2000초, 트래픽 주기: 10초)
채널	대역폭 5Kbps, 주파수 300KHz
슈퍼프레임 크기	가변(1.3초 ~ 2.8초)
MFAN 크기	10m X 10m
CSMA/CA 파라미터	BE <sub>min</sub> : 3, BE <sub>max</sub> : 6,
BO, SO	3
GTS 최대 수	7
변조 방식	BPSK
전력 손실 모델	1/r <sup>3</sup> (r: 전송 거리, meter)

것으로 가정한다. 구체적인 CBR 트래픽 파라미터 값은 표 1에 나타난 것과 같이 40초 시점에서 CBR 트래픽 발생이 처음으로 발생하고 그 이후에 10초 간격으로 새로운 CBR 트래픽이 발생한다. 발생하는 CBR 트래픽의 패킷 크기는 32바이트이다. 사용하는 주파수 대역 및 데이터 전송률은 규격 상에 나타난 것과 같이 저주파 대역인 300KHz와 5Kbps를 가정한다. MFAN의 크기는 10m X 10m 이고 그 공간 내에서 그림 5에서와 같은 형태로 MFAN이 구성된다.

또한 자기장 통신 매체 접근 제어 프로토콜과 기존의 IEEE 802.15.4 매체 접근 제어 프로토콜과의 성능을 비교하기 위해서 IEEE 802.15.4 매체 접근 제어 프로토콜의 동작과 관련된 파라미터들을 표 1에 포함하였다. CSMA/CA 동작과 관련하여 백오프(backoff) 구간의 크기를 결정하는 파라미터인 BE<sub>min</sub>와 BE<sub>max</sub> 값을 각각 3과 6으로 가정한다. 슈퍼 프레임의 구성과 관련된 파라미터인 superframe order(SO)와 beacon order(BO) 값은 모두 3이고 하나의 슈퍼 프레임 내에 guaranteed time slots(GTS)는 최대 7개까지 할당할 수 있다. GTS는 각 노드에서 패킷 전송을 위해 할당된 슬롯을 의미한다. 주파수와 대역폭 및 네트워크 토폴로지는 두 프로토콜에 대해서 동일하게 적용하고, 물리 계층 파라미터로서 변조 방식은 BPSK를 사용하고 전력 손실 모델은 1/r<sup>3</sup>을 사용하는 것으로 가정하였다.

매체 접근 제어 프로토콜의 성능을 평가하기 위한 척도들로서 합류 완료 시간과 평균 패킷 전송 지연 시

간을 사용한다. 합류 완료 시간은 MFAN 내에 모든 MFAN-N 노드들이 MFAN 합류를 완료하는 데까지 소요된 시간을 의미한다. 그리고 평균 패킷 전송 지연 시간은 MFAN-N노드로부터 발생한 CBR 트래픽 패킷이 목적지인 MFAN-C 노드에 도착하기까지 소요된 시간을 의미한다. 합류 과정과 합류 이후의 패킷 전송 과정은 패킷을 전송하기 위해서 채널에 접근하는 방법 측면에서 서로 다른 특성을 가지므로 이 두 가지 과정을 구분하여 분석할 필요가 있다. 합류 과정에서는 경쟁 기반으로 패킷을 전송하지만, 합류 과정 이후에는 합류 시에 할당 받은 슬롯을 이용해서 경쟁 없이 패킷을 전송하게 된다. 합류 완료 시간에 대해서는 시뮬레이션 뿐만 아니라 분석 방법을 통해서 성능을 살펴본다.

### 3.2 합류 완료 시간 성능 분석

MFAN에 포함된 모든 MFAN-N 노드들이 MFAN에 합류하는 데에 소요되는 시간(D<sub>join</sub>)은 아래 수식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. D<sub>join</sub>는 N<sub>total</sub> 개의 MFAN-N 노드 모두가 d 시간 슬롯에서 모두 합류에 성공할 확률인 P(0,1,d)값과 합류가 완료된 시점인 d 값을 곱한 값들의 합으로 표현된다.

$$D_{join} = \sum_{d=N_{total}}^{\infty} d \times P(0,1,d) \quad (1)$$

여기서 N<sub>total</sub>는 MFAN 내의 MFAN-N 노드들의 총 수를 나타내고, P(N<sub>join</sub>, S<sub>cur</sub>, S<sub>last</sub>)는 S<sub>last</sub>번째 시간 슬롯에서 모든 MFAN-N 노드들이 MFAN에 합류를 완료할 확률을 나타낸다. P(N<sub>join</sub>, S<sub>cur</sub>, S<sub>last</sub>)의 첫 번째 파라미터인 N<sub>join</sub>는 현재 시간 슬롯을 나타내는 두 번째 파라미터인 S<sub>cur</sub>시점에서 이미 MFAN에 합류된 MFAN-N 노드의 수를 나타낸다. 세 번째 파라미터인 S<sub>last</sub>는 모든 MFAN-N노드들이 합류를 완료하는 시간 슬롯의 위치를 나타낸다. P(N<sub>join</sub>, S<sub>cur</sub>, S<sub>last</sub>)는 아래의 수식과 같이 재귀적인(recursive) 방법으로 정의될 수 있다.

$$P(N_{join}, S_{cur}, S_{last}) = P_r \text{, if } S_{cur} = S_{last} \quad (2)$$

$$(1 - P_r) \times P(N_{join}, S_{cur} + 1, S_{last}) \text{, if } N_{join} = (N_{total} - 1) \quad (3)$$

$$P_s \times P(N_{join} + 1, S_{cur} + 1, S_{last})$$

$$\text{if } N_{join} + (S_{last} - S_{cur} + 1) = N_{total} \quad (4)$$

$$P_s \times P(N_{join} + 1, S_{cur} + 1, S_{last}) + (1 - P_s) \times P(N_{join}, S_{cur} + 1, S_{last}), \text{otherwise} \quad (5)$$

여기서  $P_r$ 은 합류 응답 패킷에 대한 전송 확률을 나타낸다.  $P_s$ 는 현재 시간 슬롯에서 임의의 합류 응답 패킷이 전송에 성공할 확률을 의미하고 수식 (6)으로 정의된다.

$$P_s = (N_{total} - N_{join}) \times P_r \times (1 - P_r)^{(N_{total} - N_{join} - 1)} \quad (6)$$

수식 (2)는 현재 시간 슬롯( $S_{cur}$ )과 마지막 시간 슬롯( $S_{last}$ )이 같은 경우일 때의  $P(N_{join}, S_{cur}, S_{last})$ 값을 정의한 것이다. 마지막 시간 슬롯에서는 마지막으로 합류하는 MFAN-N 노드가 합류에 성공해야 하므로  $P(N_{join}, S_{cur}, S_{last})$ 는 마지막 남은 MFAN-N 노드가 합류 응답 패킷 전송을 시도할 확률 값인  $P_r$ 으로 정의된다. 수식 (3)은 현재의 시간 슬롯에서 마지막 하나의 MFAN-N 노드를 제외한 모든 MFAN-N 노드들이 이미 합류에 성공한 경우의  $P(N_{join}, S_{cur}, S_{last})$ 값을 정의한 것이다. 이때는 마지막 시간 슬롯 때까지는 마지막으로 합류하는 MFAN-N 노드가 합류 응답 패킷을 전송하지 않아야 한다. 수식 (4)는 현재의 시간 슬롯부터 마지막 시간 슬롯까지 ( $S_{last} - S_{cur} + 1$ )개의 시간 슬롯들에서 모든 MFAN-N 노드들이 합류에 성공해야 하는 경우의  $P(N_{join}, S_{cur}, S_{last})$ 값을 정의한 것이다. 수식 (5)는 그 외의 경우에 대한  $P(N_{join}, S_{cur}, S_{last})$ 값을 정의한 것이다.

### 3.3 분석 및 시뮬레이션 결과

#### 3.3.1 합류 완료 시간

그림 6에서는 자기장 통신 매체 접근 제어 프로토콜에 대한 합류 완료 시간 성능을 보여주고 있다. 여기서 합류 응답 패킷을 전송하는 데에 있어서 다양한 전송 확률( $P_r$ ) 값을 고려하였고, 시뮬레이션뿐만 아니라 수식 (1)을 이용한 수치적 분석 방법을 통한 결과도 함께 나타내었다. 결과에 따르면, MFAN 내에 MFAN-N 노드 수가 많을수록 합류 완료 시간 성능은 악화되는 것을 알 수 있다. 이는 MFAN-N 노드 수가 증가할수록 각 노드가 전송하는 합류 응답 패킷 간에 충돌을 줄이기 위해서 합류 응답 패킷 전송 확률을 감

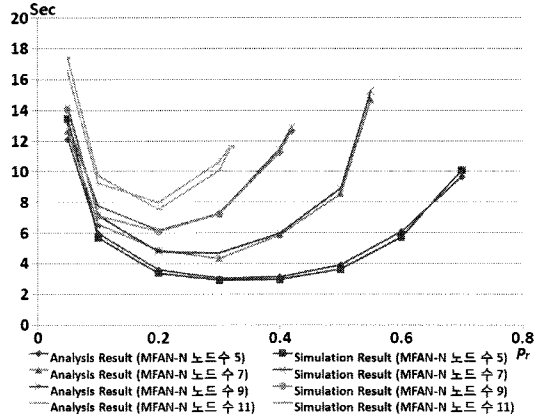


그림 6. 전송 확률에 따른 합류 완료 시간 성능

소시켜야 하고 이는 모든 MFAN-N 노드들이 합류를 완료하는 데에 소요되는 시간을 증가시키는 원인으로 작용한다. MFAN-N 노드 수에 따른 최적의 합류 응답 패킷 전송 확률 값은 MFAN-N 노드 수가 5, 7, 9, 11에 대해서 각각 0.3, 0.3, 0.2, 0.2인 것을 알 수 있다. 상호 경쟁하는 MFAN-N 노드 수에 비해서 합류 응답 패킷 전송 확률이 너무 클 경우에는 각 MFAN-N 노드로부터 전송 시도된 합류 응답 패킷들의 수가 증가하고 이로 인해서 합류 응답 패킷들 간에 충돌이 빈번하여 지기 때문에 MFAN에 합류되는 데에 소요되는 시간이 길어지게 된다. 또한 합류 응답 패킷 전송 확률이 너무 작은 경우에는 각 MFAN-N 노드로부터 합류 응답 패킷이 전송 시도될 확률이 줄어들면서 네트워크에 합류되는 데에 소요되는 시간이 역시 길어지는 현상이 발생하게 된다. 그림 6에서는 합류 완료 시간에 대한 분석 방법에 의한 결과와 시뮬레이션에 의한 결과가 거의 일치하는 것을 확인할 수 있다. 이는 본 논문에서 제시한 분석 방법이 유효함을 의미한다.

그림 7은 MFAN-N 노드 수가 증가함에 따른 자기장 통신 매체 접근 제어 프로토콜과 IEEE 802.15.4 매체 접근 제어 프로토콜의 합류 완료 시간 성능을 비교한 것이다. 이때 자기장 통신 매체 접근 제어 프로토콜에 대한 전송 확률 값은 그림 6의 결과를 기반으로 하여 0.2로 가정하였다. 결과에 따르면 자기장 통신 매체 접근 제어 프로토콜의 합류 완료 시간 성능이 우수함을 알 수 있다. 이는 IEEE 802.15.4 매체 접근 제어 프로토콜이 네트워크 합류와 함께 패킷 전송을 위한 슬롯을 예약하기 위해서는 스캔(scan) 과정과 네트워크 등록(association) 과정을 거쳐 패킷 전송을 위해 GTS를 할당 받는 별도의 복잡한 신호 절차를 거쳐야 하기 때문이다.

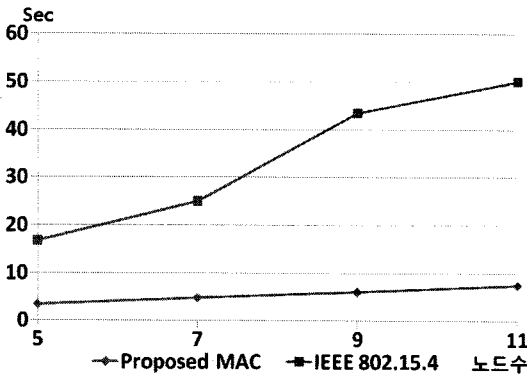


그림 7. 노드 수에 따른 합류 완료 시간 성능 비교

### 3.3.2 평균 패킷 전송 지연 시간

그림 8은 MFAN-N 노드 수가 증가함에 따른 자기장 통신 매체 접근 제어 프로토콜과 IEEE 802.15.4 매체 접근 제어 프로토콜의 평균 패킷 전송 지연 시간에 대한 시뮬레이션 결과를 보여준다. 여기서 자기장 통신 매체 접근 제어 프로토콜에 대한 전송 확률 값은 그림 6의 결과를 바탕으로 0.2로 가정하였다.

그림 8에 나타난 결과에 따르면 자기장 통신 매체 접근 제어 프로토콜의 평균 패킷 전송 지연 시간 성능이 우수한 것을 알 수 있다. IEEE 802.15.4의 경우 슈퍼 프레임의 크기가 노드 수에 상관없이 고정되어 있다. 뿐만 아니라 슈퍼 프레임 내에 할당할 수 있는 GTS의 수가 규격 상 최대 7로 고정되어 있기 때문에, 노드 수가 7을 넘게 되면 두 개의 슈퍼 프레임마다 한번의 패킷 전송이 이루어지게 되어 평균 패킷 전송 지연 시간이 증가하는 모습을 보여 준다. 반면에 자기장 통신 매체 접근 제어 프로토콜의 경우 MFAN 내에 MFAN-N 노드 수가 증가함에 따라 그 수에 비례해서 동적으로 슈퍼 프레임의 크기가 증가하기 때문에 평균 패킷 전송 지연 시간이 점진적으로 증가하게 된다. 슈퍼 프레임의 크기는 표 1에 나타난 것과 같이

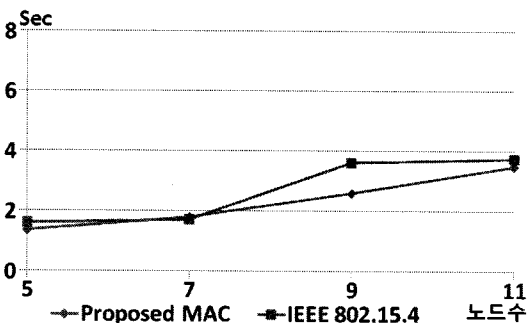


그림 8. 노드 수에 따른 평균 패킷 전송 지연 시간 성능 비교

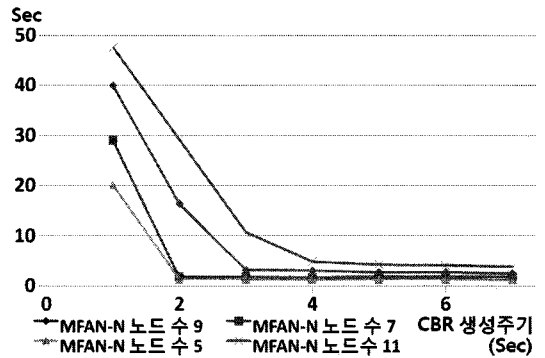


그림 9. CBR 생성 주기에 따른 평균 패킷 전송 지연 시간

MFAN-N 노드 수가 5, 7, 9, 11일 때 각각 1.3초, 1.8초, 2.3초, 2.8초로 동적으로 결정된다.

그림 9에서는 자기장 통신 매체 접근 제어 프로토콜에 대해서 CBR 트래픽의 생성 주기의 변화에 따른 평균 패킷 전송 지연 시간 성능의 변화를 보여 준다. 결과에 따르면 MFAN-N 노드의 수가 많을수록 전체적인 패킷 전송 지연 시간이 증가하는 것을 알 수 있다. 그리고 트래픽의 생성 주기가 슈퍼 프레임의 크기보다 짧아지는 시점부터는 평균 패킷 전송 지연 시간 성능이 급격하게 악화되는 현상을 보여 준다. 이는 트래픽의 발생 주기가 슈퍼 프레임의 크기보다 더 작게 되면 슈퍼 프레임 내에서 데이터 패킷의 전송이 완료되기 전에 새로운 트래픽이 발생하게 되고 생성된 트래픽이 송신 큐(queue)에 누적되면서 패킷 전송 지연 시간이 급격히 증가하기 때문이다.

## IV. 결 론

본 논문에서는 KS 규격으로 제정된 자기장 통신 매체 접근 제어 프로토콜의 성능을 분석하였다. 성능에 대한 평가 척도로서 합류 완료 시간과 평균 패킷 전송 지연 시간을 사용하였고, 각 평가 척도에 대해서 기존의 IEEE 802.15.4 매체 접근 제어 프로토콜의 성능과 비교하였다. 분석 결과에 따르면 합류 완료 시간과 평균 패킷 전송 지연 시간 모두에 대해서 자기장 통신 매체 접근 제어 프로토콜이 IEEE 802.15.4 매체 접근 제어 프로토콜보다 우수한 결과를 보였다. 이는 자기장 통신 매체 접근 제어 프로토콜이 네트워크 합류 절차를 간소화 하고 패킷의 크기 변화에 따라 동적으로 슈퍼 프레임을 구성할 수 있도록 하여 슈퍼 프레임의 크기를 줄일 수 있었기 때문이다. 또한 트래픽의 생성 주기는 슈퍼 프레임의 크기보다 커야 함도 알 수 있었다. 본 논문에서 추가적으로 고려한 전송 확률 기

반의 합류 응답 패킷 전송 방식에서는 MFAN 내에 MFAN-N 노드의 수에 따라서 최적의 전송 확률이 존재한다는 것을 알 수 있었고, 모든 MFAN-N 노드들이 동시에 네트워크 합류를 원하는 최악의 상황을 고려한다면 보다 효율적인 합류 응답 패킷 전송 방식에 대한 연구가 필요하리라 본다.

### 참 고 문 헌

[1] I.F. Akyildiz, E.P. Stuntebeck, "Wireless Underground Sensor Networks: Research Challenges", *Ad Hoc Networks Journal*, Vol. 4, pp.669-686, 2006.

[2] L. Li, M.C. Vuran, I.F. Akyildiz, "Characteristics of Underground Channel for Wireless Underground Sensor Networks", The sixth annual mediterranean Ad Hoc networking workshop, pp.92-99, June, 2007.

[3] 임승욱, 강신재, "자기장통신기술 소개 및 표준화 동향", *TTA journal* no. 127, pp.83-88, 2010.

[4] Z. Sun, I.F. Akyildiz, "Underground Wireless Communication using Magnetic Induction", ICC 2009, pp.1-5, 2009.

[5] Y.J. Won, S.J. Kang, S.H. Kim, D. Choi, S.O. Lim, "A Communication System Using Magnetic Fields", *Wireless VITAE'09*, pp.265-269, 2009.

[6] S.H. Kim, Y.J. Won, Y.S. Lim, K.H. Seo, S.O. Lim, "Design of Physical Layer for Magnetic Field Area Network", *Ubiquitous Information Technologies & Applications*, pp.1-4, 2009.

[7] 정의훈, 원윤재, 임승욱, "자기장 통신을 위한 매체 접근 제어 프로토콜", 2010년도 한국통신학회 동계종합학술발표회, 2월 2010년.

[8] J.I. Agbinya, M. Masihpour, "Near Field Magnetic Induction Communication Link Budget: Agbinya-Masihpour Model", 2010 Fifth International Conference on Digital Object Identifier, pp.1-6, 2010.

[9] I.F. Akyildiz, Z. Sun, M.C. Vuran, "Signal propagation techniques for wireless underground communication networks", *Physical Communication*, pp.167-183, 2009.

[10] Z. Sun, P. Wang, M.C. Vuran, M.A. Al-Rodhaan, A.M. Al-Dhelaan, "MISE-PIPE:

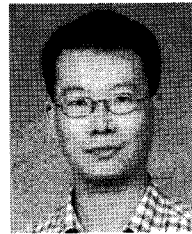
Magnetic induction-based wireless sensor networks for underground pipeline monitoring", *Ad Hoc Networks*, pp.218-227, 2011.

[11] KS X 4651-1:2009, "정보기술 - 자기장 통신 네트워크 - 저주파 대역 - 제 1부: 물리 계층 요구 사항".

[12] KS X 4651-2:2009, "정보기술 - 자기장 통신 네트워크 - 저주파대역 - 제 2부: 매체 접근 제어 계층 요구 사항".

### 정 의 훈 (EuiHoon Jeong)

정회원



1991년 경북대학교 컴퓨터공학과 졸업

1994년 KAIST 전산학과 석사

2000년 KAIST 전산학과 박사

2000년~2002년 한국전자통신연구원

구원 IMT-2000개발본부 단

말기모뎀연구팀 선임연구원

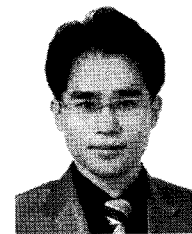
2003년~현재 한국산업기술대학교 컴퓨터공학과 부

교수

<관심분야> 이동통신 및 센서네트워크 프로토콜

### 원 윤 재 (YunJae Won)

정회원



2000년 고려대학교 산업공학과 졸업

2002년 고려대학교 산업시스템 공학과 석사

2000년~2001년 (주)비클렉 기술 이사

2002년~현재 전자부품연구원 선임연구원

<관심분야> 자기장통신, 무선충전, 센서네트워크, IT 융합시스템



김 선 희 (SunHee Kim)

정회원



2000년 이화여자대학교 전자공학과 졸업  
2002년 이화여자대학교 정보통신학과 석사  
2002년~2005년 한국전자통신연구원 연구원  
2005년~현재 전자부품연구원 선임연구원

<관심분야> 무선센서네트워크, 무선통신, 자기장통신

방 영 철 (Young-Cheol Bang)

정회원



1994년 University of Oklahoma 전산학과 졸업  
1997년 University of Oklahoma 전산학과 석사  
2000년 University of Oklahoma 전산학과 박사  
2000년~2002년 한국전자통신연구원 선임연구원

2002년~현재 한국산업기술대학교 컴퓨터공학과 부교수

<관심분야> 유/무선 라우팅 프로토콜, 홈네트워크, 멀티미디어 전송, 차세대 영상시스템

임 승 옥 (SeungOk Lim)

정회원



1997년 건국대학교 전자공학과 졸업  
1999년 건국대학교 전자공학과 석사  
2005년 건국대학교 전자정보통신공학과 박사  
1999년~2000년 성미전자 연구원

2001년~현재 전자부품연구원 단장

<관심분야> 무선센서네트워크, 무선통신, 자기장통신