

# 오류 정정 부호를 사용하는 범용 무선 통신 칩으로 구현된 스마트 미터링 무선 네트워크 시스템 성능 분석

## Performance Analysis of Wireless Communication Networks for Smart Metering Implemented with Channel Coding Adopted Multi-Purpose Wireless Communication Chip

왕 한 호<sup>†</sup>  
(Hanho Wang)

**Abstract** - Smart metering is one of the most implementable internet-of-thing service. In order to implement the smart metering, a wireless communication network should be newly designed and evaluated so as to satisfy quality-of-service of smart metering. In this paper, we consider a wireless network for the smart metering implemented with multi-purpose wireless chips and channel coding-functioned micro controllers. Especially, channel coding is newly adopted to improve successful frame transmission probability. Based on the successful frame transmission probability, average transmission delay and delay violation probability are analyzed. Using the analytical results, service coverage expansion is evaluated. Through the delay analysis, service feasibility can be verified. According to our results, channel coding needs not to be utilized to improve the delay performance if the smart metering service coverage is several tens of meters. However, if more coverage is required, channel coding adoption definitely reduces the delay time and improve the service feasibility.

**Key Words** : Smart metering, Wireless network, Delay QoS control

### 1. 서 론

사물 인터넷은 기존에 개별적으로 단독으로 동작하던 기계 및 전자 장치에 통신 기능을 부여하게 되는 것으로부터 시작된다. 통신 기능이라 함은 주로 무선 통신 기능을 의미하며, 무선 통신이 가능해진 장치는 측정 가능한 값이나 제어 명령을 송수신할 수 있게됨으로써 새로운 기능과 서비스를 지원할 수 있게 된다[1, 2]. 특히 스마트 미터링(smart metering) 분야는 사물 인터넷 분야에서도 구현 가능성이 가장 높은 사물 인터넷 서비스 분야이다[3]. 실시간 전력 사용량 측정하고 그 정보가 무선 통신 시스템을 통하여 중앙의 데이터 베이스에 수집됨으로써 전력 사용량을 실시간에 가깝게 모니터링할 수 있게 된다. 전력의 생산과 수요처에 대한 실시간 정보가 활용 가능하게 된 것은 스마트 그리드(smart grid)와 같은 새로운 산업 탄생에 기여하였다. 이 때 사용하게 되는 무선 통신 시스템은 다양한 형태로 구현될 수 있으나, 본 논문에서는 범용 무선 통신 칩을 이용하여 구현된 스마트 미터링 네트워크에 집중하였다[4].

일반적으로 범용 무선 통신 칩은 통신 속도, 변조 기법, 프레임의 길이를 선택하여 결정할 수 있으며, 다중 사용자 접속(multi-user access)을 위한 프로토콜이나 무선 전송 시 발생할 수 있는 오류에 대한 대응 기술을 탑재하고 있지 않

다. 접속(multi-user access)을 위한 프로토콜이나 무선 전송 시 발생할 수 있는 오류에 대한 대응 기술을 탑재하고 있지 않다. 또한 신호를 송신할 때 사용하는 전력의 크기가 수 밀리와트(mW)에 불과하므로 송수신 거리 또한 수십미터 이내로 제한된다. 그러나 무선 통신 거리에 따라 이기종의 무선 통신 칩을 사용하여 네트워크를 구성하는 것은 다중 접속 프로토콜의 복잡도를 증가시키는 문제를 야기하며, 통신 품질 또한 균일하지 않으므로 신뢰성 있는 네트워크 운용을 어렵게 한다. 따라서 본 논문에서는 범용 무선 통신 칩을 제어하기 위한 마이크로 프로세서에 구현되는 오류 정정 부호를 제안하고, 오류 정정 부호를 무선 통신 칩 외부에 구현함에 따른 통신 성능을 전송 지연 관점에서 분석한다. 기존의 시스템에서는 측정된 값이 마이크로 컨트롤러의 입력을 거쳐 직렬 통신 등을 통하여 무선 통신 칩에 전달되면 그대로 프레임을 구성하여 전송되어 전송 시 발생하는 오류에 취약하였고 재전송이 필요한 관계로 많은 전송 지연이 발생하였다[5]. 반면 오류 정정 부호를 마이크로 컨트롤러에 구현하게 되면 무선 통신 칩은 그대로 사용하면서 펌웨어 업데이트만으로 전송 오류 성능을 개선할 수 있으며, 적은 오류 발생으로 프레임 전송 성공 확률이 증가하면 재전송의 감소로 전송 지연 또한 감소하게 된다[6, 7].

본 연구주제와 관련하여 최신 연구 결과들을 살펴보면 다음과 같다. M2M 네트워크에서 다중 채널 임의의 접속을 사용할 때 발생할 수 있는 전송 지연과 전송 지연을 최적화하기 연구가 진행되었다[8]. 최적화하기 위하여 단말들의 접속 확률을 제어하는 방식을 사용하였다. 간섭원이 스마트 그리드 단말의 무선 통신을 방해하는 상황에서 전송 지연을 개선하기 위한 연구가 진행되었다[9]. 이러한 상황에서 추가 정보

<sup>†</sup> Corresponding Author : Dept. of Information and Telecommunication Engineering, Sangmyung University, Korea  
E-mail : hhwang@smu.ac.kr

접수일자 : 2015년 9월 30일

수정일자 : 2015년 11월 2일

최종완료 : 2015년 11월 19일

전송을 통하여 전송 지연을 최적화 한다. 스마트 그리드 무선 네트워크에서 전송 지연을 최적화하기 위하여 네트워크 요소들의 기능 제어에 대하여 연구하였다[10]. 송신 전력 제어를 통하여 전송 지연 요구를 만족시키는 기법을 제안하고 있다. 이러한 최근 연구들은 모두 전송 중 오류 발생에 의한 전송 지연 문제를 고민하고 있었으며, 문제에 관여하고 있는 네트워크 요소들의 동작 파라미터를 제어하는 방식으로 문제를 해결하려고 하고 있다. 본 논문에서는 오류 정정 부호를 도입함으로써 오류 발생 빈도 자체를 감소시키는 방법을 제안하고 성능을 분석해 보고자 한다.

오류 정정 부호를 도입함에 따른 성능 개선을 분석하기 위하여 신호 대 잡음비를 계산함에 있어 부호화 이득(coding gain)을 반영하였다. 이로부터 한 개의 비트(bit) 정보의 전송 오류 확률을 구하여 하나의 데이터 프레임이 성공적으로 전송될 확률에 반영하였다. 하나의 데이터 프레임이 전송하는 정보량은 서비스의 다양성을 고려하여 다양한 값으로 설정하여 실험 결과에 제시하였다. 다중 사용자 접속 프로토콜로는 마이크로 프로세서가 감당할 수 있는 연산 복잡도를 고려하여 슬롯 알로하(slot ALOHA)를 사용하였고, 다중 사용자 접속 시 발생할 수 있는 충돌(collision)을 고려하여 평균 전송 지연 시간과 전송 지연 임계치 초과 확률을 분석한다. 모든 분석 결과는 통신 거리에 따른 성능으로 제시된다. 도출된 결과에 기반하여 스마트 미터링 무선 통신 네트워크의 서비스 거리 확대 가능성을 판단하고 적합한 네트워크 구조를 제안한다.

## 2. 본 론

### 2.1 시스템 모델

무선 통신 네트워크는 무선 통신 칩으로 구현된 개별 노드들에 의하여 구성된다. 개별 노드들은 전력 사용량을 측정하게 되는 계측 장치가 만들어진 정보를 별도로 설치된 정보 수집 노드에 전송한다. 정보 수집 노드는 우리가 흔하게 사용하는 이동통신 노드기가 될 수도 있고, WiFi 액세스 포인트(access point)가 될 수도 있으나, 본 논문에서는 일반적인 범용 무선 통신 칩을 이용하여 별도로 개발된 장치라고 가정한다. 이러한 가정을 통하여, 실질적으로 구현할 수 있는 장치에 대한 성능 분석을 할 수 있으며, 무선 통신에서 발생할 수 있는 일반적인 문제점들을 성능 지표화(performance metric)하여 성능 분석에 반영할 수 있다.

본 논문에서 고려하고 있는 시스템은 그림 1에 도시되어 있다. 다중 사용자 접속 프로토콜과 무선 전송 데이터 오류를 감소시키기 위한 오류 정정 부호(error correction code)는 마이크로 컨트롤러에 구현된다. 스마트 미터링의 경우 많은 양의 데이터를 전송하지 않으므로 마이크로 프로세서에 일반적으로 구현되어 있는 직렬 통신(serial communication) 방식인 SPI나 USART 방식을 이용하여 데이터를 무선 통신칩에 전송한다. 전송할 데이터는 다중 사용자 접속 프로토콜과 오류 정정 부호화 과정을 거쳐 무선 전송을 위한 프레임으로 만들어진다. 프레임으로 만들어진 데이터는 무선 전송이 된다. 본 연구에서는 마이크로 프로

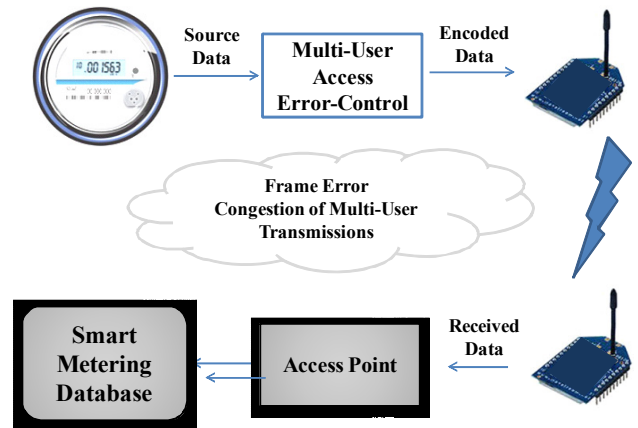


그림 1 범용 무선 통신 칩으로 구현된 스마트 미터링 장치  
Fig. 1 Smart metering system implemented with multi-purpose wireless communication chip

세서의 연산 능력을 고려하여 다중 사용자 접속 프로토콜로 슬롯 알로하(slotted ALOHA) 프로토콜을 사용하며, 오류 정정 부호로 부호화율(code rate)이 1/2인 길쌈 부호(convolutional code)를 사용한다.

### 2.2 평균 전송 시간 및 지연 분석

무선 통신 시스템에서 데이터 전송 시 발생하는 비트 오류(bit error)는 수신기에서 수신되는 신호 강도가 낮을수록 많이 발생한다. 기존의 연구에서 무선 전송 시 오류가 발생할 확률은 수신기의 신호 대 잡음비(signal-to-noise ratio, SNR)에 대한 함수이다. 일반적으로 수신 신호 강도는 송신기와 수신기 간 거리가 멀어짐에 따라 감소하게 되며, 송수신기 간 거리가  $d$  라고 할 때 수신 신호 강도는 다음과 같이 계산될 수 있다[11].

$$s = 10 \log_{10} P_T - 52.94 - 18.78 \log_{10} d \quad (1)$$

수식 (1)에서  $P_T$ 는 송신기의 송신 전력이며, 최소 거리에서의 신호 감쇄와 거리에 따른 신호 크기 감쇄가 적용되었다. 일반적인 범용 통신 칩에서 송신 전력은 10 mW 이하를 사용하고 있다. 신호 감쇄 지수 1.878로 적용되어 있으며 가시광(line-of-sight, LoS) 채널이 생성되지 않는 일반적인 통신 경로에서 더 큰 값을 가질 수 있다. 신호 감쇄 지수의 값이 클수록 거리에 따라 신호 감쇄가 커진다. 수신 신호 강도가 정의되면, 잡음의 정도는 상수로 주어지므로 신호 대 잡음비를 계산해 볼 수 있다. 다음은 수신 신호를 수식으로 표현한 것이다.

$$r = \sqrt{G_c \cdot s + n} \quad (2)$$

수식 (2)에서  $G_c$ 는 오류 정정 부호를 사용하게 됨에 따라 얻게 되는 신호 대 잡음 비 이득(SNR gain)이다. 일반적으로 부호화 이득(coding gain)으로 표현하며 오류 정정 부호

화기(encoder)에서 사용하는 이동 레지스터(shift register)의 수에 비례하는 구속 길이(constraint length)에 따라 신호 대 잡음 비 이득의 양이 달라진다. 구속 길이는 복호화기(decoder)의 연산 복잡도에 연관이 있어 구속 길이 값이 클수록 복호 시 복잡한 연산이 많이 수행되며 수신기의 전력 소비가 증가한다.  $n$ 은 수신기 열잡음으로 정규분포를 따르는 랜덤 변수이며 분산 값으로 그 크기가 측정된다. 통상 상수 값으로 주어지며  $-174$  dBm/Hz의 값을 사용한다. 신호가 차지하는 주파수 대역폭을 곱하여 사용하면 수신기의 신호 대 잡음비를 다음과 같이 구할 수 있다.  $N$ 은 신호가 차지하는 대역폭을 고려한 잡음의 양이다.

$$x = \frac{G_c \cdot s}{N} \quad (3)$$

LoS 채널이 생성되어 있지 않은 일반적인 무선 통신 채널은 레일리(Rayleigh) 확률 분포 함수(probability distribution function)를 따른다고 가정할 수 있으므로, 레일리 채널 환경에서 QPSK의 비트 오류 확률을 참조하면 다음과 같다[12].

$$P_B = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{x}{1+x}}\right) \quad (4)$$

QPSK는 대부분의 범용 무선 통신 칩에 구현되어 있다. 또한, 범용 무선 통신 칩들의 경우 동기 문제 및 참조 신호 전송 문제로 DPSK를 사용하고 있기도 하며, 그러한 경우 미리 유도되어 있는 비트 오류 확률 수식을 대체하여 사용하면 된다. 그 밖에도 현재 범용 무선 통신칩에서 사용하고 있지 않은 MQAM(M-quadrature amplitude modulation)에 대해서도 과거의 연구를 통하여 유도되어 있는 수식을 사용할 수 있을 것이다.

데이터가 전송될 때는 데이터 그 자체로 전송되지 않으며, 오류 정정 부호화 후 프레임 형태로 묶여 전송된다. 본문에서는 오류 정정 부호의 부호화율로 1/2을 사용한다. 따라서 스마트 미터링 장치에서 생성된 데이터는 부호화 된 후 두 배의 데이터량을 가지게 된다. 수신단에서 오류 정정 능력에 비례하는 오류 정정 부호의 구속 길이는 변화시켜 적용하도록 한다. 부호화율이 1/2인 오류 정정 부호화기를 사용할 때 구속 길이에 따른 수식 (2)의 부호화 이득  $G_c$ 는 다음과 표와 같다.

**표 1** 오류 정정 부호의 구속 길이에 따른 부호화 이득

**Table 1** Constraint length and coding gain

구속 길이	2	5	9	11
부호화 이득	0.00 dB	3.97 dB	6.99 dB	7.78 dB

오류 정정 부호의 부호화 이득을 고려한 프레임 오류 확률을 구하도록 한다. 특정 주기마다 발생하는 측정 정보들 프레임화하여 전송할 때 프레임이 성공적으로 전송될 확률은 다음과 같다.

$$P_{sf} = (1 - P_B)^F \quad (5)$$

수식 (5)에서  $F$ 는 하나의 프레임에서 전송되는 데이터 비트의 수이다. 오류 정정 부호를 사용하더라도 복호화기 출력에 대하여 적용하므로 동일한  $F$ 값을 사용한다.

다중 접속 프로토콜로 슬롯 할로하를 사용한다. 하나의 슬롯에 하나의 프레임이 전송되어야 하므로 슬롯의 길이는  $F$ 에 비례한다. 스마트 미터링 장치로부터 데이터가 생성되면 노드는  $p$ 의 확률로 매 슬롯에서 전송할 수 있다. 특정 슬롯에서 데이터 프레임이 전송되었을 때 데이터가 AP에서 비트 오류 없이 수신되는 경우는 하나의 슬롯에서 하나의 스마트 미터링 노드만 데이터 프레임을 전송하고 그 데이터 프레임에 오류가 없는 때 뿐이다. 둘 이상의 스마트 미터링 노드가 데이터를 전송하고 상호 간섭이 발생하였음에도 그 중 하나의 노드의 데이터가 오류없이 복호되는 포획 효과(capture effect)는 고려하지 않는다. 하나의 AP에  $M$ 개의 노드들이 데이터를 전송하고 있을 때 전송된 데이터 프레임이 성공적으로 AP에서 복호될 확률은 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$P_S = p \cdot (1-p)^{M-1} \cdot P_{sf} \quad (6)$$

수식 (6)의 확률을 제외하면 나머지 확률은 특정 슬롯에서 아무것도 전송하지 않거나, 전송하였더라도 프레임 오류가 발생하였을 확률을 의미한다. 따라서 데이터가 최초 생성한 이후  $K$  번째 슬롯에서 데이터 전송이 성공할 확률은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$P_S(K) = (1 - P_S)^{K-1} \cdot P_S \quad (7)$$

$K$ 는 1 이상의 정수이다. 수식 (7)을 살펴보면  $K-1$  개의 슬롯동안 데이터가 전송되지 않거나, 전송되었더라도 오류가 발생하였다가 마침내  $K$  번째 슬롯에서 데이터 프레임이 오류 없이 전송되는 경우이다.

수식 (7)로부터 스마트 미터링 장치에서 최초 데이터가 생성된 후 평균 몇 슬롯만에 데이터가 전송되었는지 계산해 볼 수 있다. 계산식은 다음과 같다.

$$K_{mean} = \sum_{K=1}^{\infty} K \cdot P_S(K) = \frac{1}{P_S} \quad (8)$$

또한 전송 지연 임계치인  $K_{th}$  번째 슬롯 이전에 전송이 성공할 확률은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$P(K_{th}) = \sum_{K=K_{th}}^{\infty} P_S(K) = (1 - P_S)^{K_{th}-1} \quad (9)$$

수식 (8)과 (9)를 사용하면 스마트 미터링 장치에서 측정된 데이터가 전송되기 위하여 필요한 평균 전송 지연 시간과 허용된 전송 지연 임계치를 위반(delay violation)하게 되는 확률을 계산할 수 있다.

### 2.3 채널 부호화 도입의 영향 분석

오류 정정 부호화를 위하여 부호화율 1/2인 길쌈 부호를

사용한다. 부호화율이 1/2라는 것은 하나의 비트 정보가 부호화기에 입력되면 두 개의 정보 비트가 생성됨을 의미한다. 이 때 추가적으로 생성된 정보비트를 부가 정보라고 한다. 따라서 채널 부호화기를 사용하게 되면 부호화 이득에 의하여 비트 오류 확률은 줄어드는 반면 프레임의 길이가 두 배로 증가하는 상황이 발생한다. 프레임의 길이 증가에 따라 슬롯의 길이 또한 증가하여야 한다.

슬롯 길이의 증가는 동일 시간 내 스마트 미터링 노드들이 전송할 기회가 줄어들게 됨을 의미한다. 따라서 스마트미터링 노드들이 각 슬롯에서 프레임을 전송할 확률이 기존  $p$ 에서  $a \cdot p$ 로 바뀐다고 할 때 수식 (6)에 대입하고 수식 (6)번과의 비율을 계산해 보면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$R(a) = \frac{p \cdot (1-p)^{M-1} \cdot P_{Sf}}{ap \cdot (1-ap)^{M-1} \cdot P_{Sf}^{CH}} \quad (10)$$

$$= \frac{(1-p)^{M-1} \cdot (1-ap)^{-M+1} \cdot P_{Sf}}{a \cdot P_{Sf}^{CH}}$$

$P_{Sf}^{CH}$ 는 오류 정정 부호를 적용하였을 때 프레임이 오류 없이 전송될 확률이다. 수식 (10)의  $R(a)$ 를  $a$ 에 대하여 미분하여 그 결과를 살펴보면 아래와 같다.

$$\frac{dR(a)}{da} = \frac{P_{Sf}(1-p)^{-1+M} \cdot (1-ap)^{-M} \cdot (aMp-1)}{P_{Sf}^2 a^2} \quad (11)$$

$aMp < 1$  이면 수식 (11)이 모든  $a$  값에 대하여 항상 음의 값을 가지게 되므로, 수식 (10)이  $a$ 에 대하여 단조 감소 함수가 된다. 따라서  $a=1/Mp$ 일 때 수식 (10)은 최소 값을 가지게 된다. 수식 (10)이 최소 값을 가지게 되는 것은 오류 정정 부호를 사용한 경우 프레임 전송 확률이 최대가 되는 경우를 의미한다.

부호화율 1/2의 오류 정정 부호를 사용하게 되면 프레임의 길이가 두 배 증가하게 되므로, 수식 (8)에 두 배의 프레임 길이를 반영하면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$K_{mean, G_C > 1} = 2 \cdot \sum_{K=1}^{\infty} K \cdot P_{S, G_C > 1}(K) = \frac{2}{P_{S, G_C > 1}} \quad (12)$$

수식 (12)를 계산함에 있어, 표 1을 참조하여 부호화 이득은 1 이상으로 프레임 오류 확률에 반영한다. 수식 (3)에 1 이상의 부호화 이득이 반영되면 프레임 오류 확률은 감소하게 된다. 수식 (12)에서 부호화 이득이 반영되는 프레임 전송 성공 확률에  $G_C > 1$ 을 표시하였다. 이로부터 오류 정정 부호를 사용하는 경우와 그렇지 않은 경우에 대하여 다음과 같은 전송 지연 개선에 대한 성능 평가 지표 정의가 가능하다.

$$D(G_C) = \frac{K_{mean}}{K_{mean, G_C > 1}} = \frac{P_{S, G_C > 1}}{2 \cdot P_S} \quad (13)$$

부호화 이득  $G_C$  값은 구속 길이에 따라 0 내지 7.78dB 까지 반영하여 실험 결과에 포함하였다.

수식 (9)의 허용된 전송 지연 임계치를 위반하게 되는 확

률에 대하여도 부호화 이득을 반영하면 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$P_{G_C}(K_{th}) = \sum_{K=\lceil K_{th}/2 \rceil}^{\infty} P_{S, G_C}(K) = (1 - P_{S, G_C})^{\lceil K_{th}/2 \rceil - 1} \quad (14)$$

전송 지연에 따른 품질은 최대 전송 지연 임계치를 위반하게 되는 확률로 평가되는 것이 일반적이다. 따라서 수식 (12)와 (13)에서 평균 전송 지연을 평가하는 것과 함께 수식 (14)를 이용하여 실질적인 전송 지연 품질을 평가할 수 있다.

## 2.4 실험 결과

결과 검증을 위하여 하나의 AP에 10개의 스마트 미터링 노드가 존재한다고 가정하였다. 스마트 미터링 노드  $M$ 의 값이 10이므로 수식 (11)의 결과에 따라 각 노드의 슬롯에서 접속 확률은  $p=1/M$ 으로 설정하였다. 대역폭이 3 Mhz인 Zigbee 칩을 고려하였다. AP에 데이터를 전송하는 노드는 AP로부터 반경 10~100 미터에 존재하며 노드의 고유 번호 (identification number), 측정 전력 값 정보, 측정 시간 정보를 고려하여  $F$  값은 256, 512, 1024 비트로 가정하였다. 그림 2는 오류 정정 부호를 사용하지 않았을 때 프레임 전송 성공 확률을 그래프로 표현한 것이다.  $F$ 값에 따라 송수신 거리가 100 미터에 이르면 10 내지 55 퍼센트(percentage)의 성공 확률을 보인다.

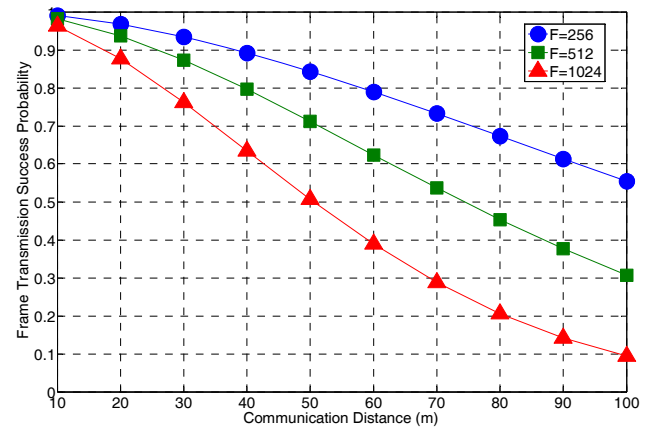


그림 2 오류 정정 부호를 사용하지 않았을 때 프레임 전송 성공 확률

Fig. 2 Frame transmission success probability

그림 3은 그림 2의 결과 중  $F$ 값이 1024인 경우에 대하여 오류 정정 부호를 사용한 경우 프레임 전송 성공률이 향상되고 있는 결과를 보여주고 있다. 구속 길이를 5로 설정하더라도 약 15 퍼센트의 프레임 전송 성공 확률의 증가 효과가 나타나며, 구속 길이를 11까지 증가하여 부호화 이득을 7.78dB 얻게 되면 100 미터 거리 기준 약 47 퍼센트의 프레임 전송 성공 확률의 증가 효과가 있다. 프레임 전송 성공 확률의 개선은 수식 (12)에서와 같이 평균 전송 지연 시간(슬롯수)에 영향을 준다. 그 결과는 그림 4에 도시되어 있다.

그림 4에는 오류 정정 부호를 사용하는 경우와 그렇지 않

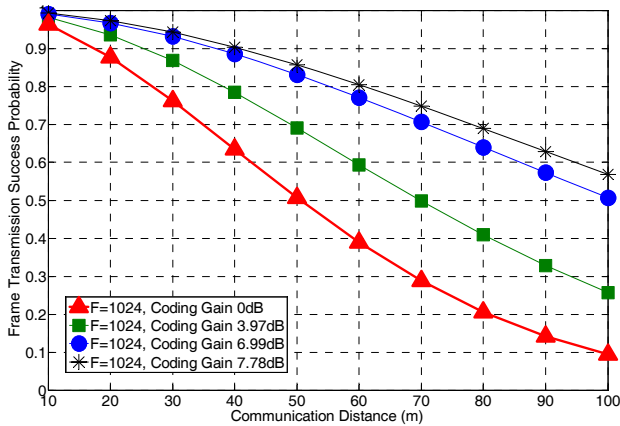


그림 3 오류 정정 부호를 사용하지 않았을 때 프레임 전송 성공 확률

Fig. 3 Frame transmission success probability with channel coding

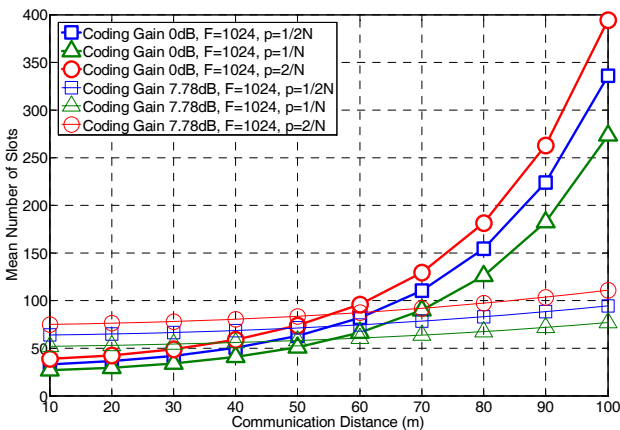


그림 4 오류 정정 부호 사용에 따른 평균 전송 슬롯의 감소

Fig. 4 Reduced mean number of slots by using channel coding

은 경우 전송이 성공할 때까지 소비되는 평균 슬롯 수가 수식 (8)과 (12)에 의하여 도시되어 있다. 슬롯의 길이가 일정하므로 지연되는 평균 슬롯의 수는 평균 시간 지연으로 환산될 수 있다. 두가지 사실이 관찰된다. 하나는 수식 (11)의 결과와 같이 접속하려는 총 노드의 수의 역수로 접속 확률을 결정하였을 때 지연되는 평균 슬롯의 수가 최소화 된다는 것이다. 두 번째는 통신 거리에 따라 오류 정정 부호 사용이 전송 지연 측면에서 유리한 상황과 불리한 상황이 존재한다는 것이다. 통신 거리가 10 내지 50 미터로 짧은 경우 SNR이 비트 오류를 내지 않을 만큼 충분하므로 오류 정정 부호를 사용하게 되면 슬롯의 길이만 두 배 늘어날 뿐 전송 지연에 있어 이득이 크지 않다. 반면 통신 거리가 50 미터 이상인 경우, SNR이 낮아지면서 비트 오류의 빈도가 크게 증가하므로 프레임의 성공적인 전송 확률이 낮아지고 전송 지연이 급격하게 증가하게 된다. 그러나 오류 정정 부호를 사용하게 되면 낮은 SNR에서도 비트 오류가 크게 증가하지 않으므로, 평균 전송 지연 시간은 통신 거리에 따라

증가는 하되 완만한 기울기를 유지하여 전송 지연 측면에서 통신 품질의 안정성을 유지할 수 있게 된다.

그림 5는 수식 (13)의 결과를 도시한 것이다. 평균 전송 지연 시간 비율(mean delay ratio)이 1 이하가 되는 통신 거리 구간이 오류 정정 부호 사용으로 전송 지연 성능이 개선되는 서비스 지역이 된다. 부호화 이득에 따라 결과가 약간 다르기는 하나, 부호화 이득이 충분히 확보되어 있는 경우 통신 거리가 약 57 미터를 넘어서면서부터 오류 정정 부호 사용에 따른 전송 지연 개선 효과가 발생하는 것으로 확인된다. 오류 정정 부호를 사용하면 SNR이 충분히 강할 때 통신 거리 10 미터 기준 전송 지연이 평균 두 배 더 발생하지만, 통신 거리가 길어지면 100 미터 거리에서 전송 지연의 75 퍼센트가 감소한다. 즉 1/4의 전송 지연만 발생한다.

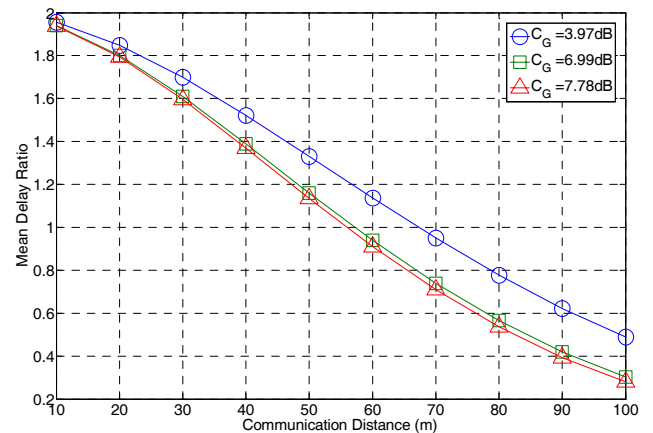


그림 5 채널 코딩에 의한 평균 전송 지연 감소  
Fig. 5 Reduced mean delay by using channel coding

그림 6에는 전송 지연 임계치 위반 확률(delay violation probability)가 도시되어 있다. 전송 지연 임계치 위반 확률은 서비스의 질을 결정하며 시스템 사용 가능 여부를 판정할 수 핵심 성능 평가 지표이다. 예를 들어 1초 마다 측정 정보를 갱신 해야만 하는 전력 사용량 측정 시스템에 있어서, 측정 후 1초가 지나도 정보 전송 지연으로 갱신이 불가능한 노드의 비율이 더 많다면 사용할 수 없는 시스템이 될 것이다. 전송 오류가 필연적으로 발생하여 모든 노드의 전송 지연이 특정 임계치 이하로 되도록 시스템을 설계하는 것은 불가능한 상황이다. 예를 들면 5 퍼센트 이하의 위반 확률이 시스템 사용 가능 여부를 결정하는 평가 지표라고 가정해보자. 그림 6에서 오류 정정 부호 사용 시 서비스 가능 지역은 AP 중심 반경 80미터 지역이다. 반면 오류 정정 부호를 사용하지 않으면 AP 중심 반경 60미터 이내만 서비스가 가능하다. 면적으로 계산하면 16:9 이므로 서비스 가능 면적이 오류 정정 부호 사용 시 약 80 퍼센트 증가한다. 스마트 미터링 무선 통신 네트워크를 구축하기 위한 기반 시설 투자 비용이 약 40% 절감됨을 의미한다. 10 퍼센트 이하의 위반 확률로 시스템 사용 가능 기준을 느슨하게 만들어 주면 오류 정정 부호의 도입에 의하여 서비스 면적이 두 배 이상 증가하게 됨을 알 수 있다. 스마트 미터링 무선 통신 네트워크를 구축하기 위한 기반 시설 투자 비용이 50% 이상 절감됨을 의미한다.

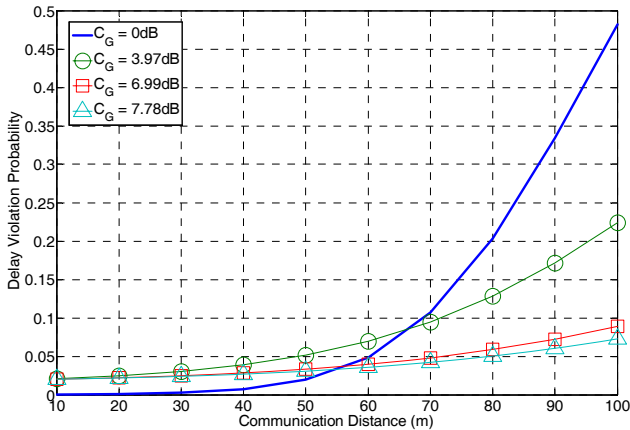


그림 6 전송 지연 위반 확률  
Fig. 6 Delay violation probability

### 3. 결 론

본 논문에서는 오류 정정 부호를 범용 무선 통신 칩 외부에 구현한 스마트 미터링 무선 통신 네트워크의 전송 지연 성능을 분석하였다. 그 결과 오류 정정 부호 도입 유무에 따라 시스템 설계를 위한 두 가지 성능 평가 지표를 발견할 수 있었다. 첫 번째 성능 평가 지표는 서비스 가능 면적이다. 이 성능 평가 지표는 무선 네트워크를 구축하기 위한 비용과 직결된다. 오류 정정 부호를 사용하면 시스템 전체적으로 전송 지연 임계치 위반 확률이 감소하여 더 넓은 서비스 지역을 확보할 수 있다는 것이다. 두 번째는 오류 정정 부호 도입이 필요한 통신 거리에 대한 성능 평가 지표이다. 매우 가까운 거리에서만 통신하는 스마트 미터링 무선 네트워크는 오류 정정 부호를 도입할 필요가 없다. 그러나 분석에 의하여 계산되는 거리 이상의 통신 거리 확보가 필요한 경우 오류 정정 부호의 도입은 전송 지연 개선에 필수적이다. 향후 연구 계획으로 본 연구의 이론적인 결과를 토대로 범용 통신 칩과 마이크로 프로세서를 이용한 테스트 베드를 구현한다. 복수의 모듈을 사용하여 거리 별로 전송 지연 성능을 측정하며 복수의 무선 통신 칩을 사용하여 전송 속도 및 전송 지연을 개선하기 위한 연구를 계속할 예정이다

### 감사의 글

본 연구는 상명대학교 2014학년도 교내연구비에 의하여 수행되었음

### References

[1] J. Kim, J. Lee, J. Kim and J. Yun, "M2M Service Platforms: Survey, Issues, and Enabling Technologies," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 16, no. 1, pp. 61-76, January 2014.  
[2] M. Hasan, E. Hossain and D. Niyato, "Random Access for Machine-to-Machine Communication in LTE-Advanced Networks: Issues and Approaches," IEEE Communications Magazine, vol. 51, no. 6, pp.

86-93, June 2013.

[3] Z. Fan, R. Haines, and P. Kulkarni, "M2M Communications for E-health and Smart Grid: an Industry and Standard Perspective," IEEE Wireless Communications, vol. 21, no. 1, pp. 62-69, January 2014.  
[4] S. Lohier, A. Rachedi, I. Sallhi, and E. Livolant, "Multichannel Access for Bandwidth Improvement in IEEE 802.15.4 Wireless Sensor Networks," 2011 Wireless Days Conf., pp. 1-6, 2011.  
[5] S. Pollin, M. Ergen, and S. Ergen, "Performance Analysis of Slotted Carrier Sense IEEE 802.15.4 Medium Access Layer," IEEE Trans. on Wireless Communications, vol. 7, no. 9, pp. 3359-3371, September 2008.  
[6] N. Tadayon, W. Honggang, and D. Kasilingam, "Analytical Modeling of Medium-Access Delay for Cooperative Wireless Networks Over Rayleigh Fading Channels," IEEE Trans. on Vehicular Technology, vol. 62, no. 1, pp. 349-359, January 2013.  
[7] G. Bianchi, "Remarks on IEEE 802.11 DCF performance analysis," IEEE Communications Letters, vol. 9, no. 8, pp. 765-767, August 2005.  
[8] H. Ho, C. Chang, and H. Hsieh, "Analyzing and Minimizing Random Access Delay for Delay-Sensitive Machine-to-Machine Communications: A New Perspective on Adaptive Persistence Control," IEEE GreenCom Conf., pp. 69-74, 2014.  
[9] Z. Lu, W. Wang and C. Wang, "Camouflage Traffic: Minimizing Message Delay for Smart Grid Applications under Jamming," IEEE Trans. on Dependable and Secure Computing, vol. 12, no. 1, pp. 31-44, January 2015.  
[10] F. Ye, Q. Yi, and R. Hu, "Energy Efficient Self-Sustaining Wireless Neighborhood Area Network Design for Smart Grid," IEEE Trans on Smart Grid, vol. 6, no. 1, pp. 220-229, January 2015.  
[11] O. Musikanon and W. Chongburee, "Zigbee Propagations and Performance Analysis in Last Mile Network," International Journal of Innovation, Management and Technology, vol. 3, no. 4, pp. 353-357, August 2012.  
[12] B. Sklar, Digital Communications Fundamentals and Applications, 2nd Edition, New Jersey: Prentice Hall, 2001.

### 저 자 소 개



### 왕 한 호 (王 瀚 鎬)

저자는 연세대학교 전기전자공학과에서 2004년과 2010년에 각각 학사, 박사 졸업하였다. 현재 상명대학교 정보통신공학과 조교수로 근무하고 있다. 연구 관심 분야는 셀룰러 시스템, 인지 무선 통신 시스템이다.