

# 5 GHz/60 GHz 다중대역을 사용하는 WLAN을 위한 대역이동 결정 기법

정 태 훈\*, 정 동 근<sup>o</sup>

## Frequency Band Selection for WLAN Using Multiple Bands of 5 GHz/60 GHz

Tae Hun Jeong\*, Dong Geun Jeong<sup>o</sup>

요 약

60 GHz 대역과 낮은 (2.4 GHz/5 GHz) 주파수 대역을 모두 사용하는 다중대역 WLAN은 송수신 단말이 충분히 가까우면 60 GHz 대역을 사용하여 Gbps 속도로 통신을 하고 단말 간의 거리가 멀면 낮은 주파수 대역에서 동작하여, 어떠한 경우에도 최적의 전송속도를 제공할 수 있다. 다중대역 WLAN의 효율적 운용을 위해서는 WLAN의 동작대역을 적절히 변경하는 대역이동 방안이 필요하다. 본 논문에서는 효과적인 대역이동 결정 기법을 설계한다. 또한 대역이동 프로토콜을 실제 구현할 때 필요한 제어프레임의 전송속도 선택 방법도 함께 제안한다. NS-3를 사용한 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 인적 차폐(human blockage) 또는 로그노말 전파음영(log-normal shadowing)이 발생하는 환경에서 제안된 기법의 성능을 평가한다.

**Key Words** : 60 GHz WLAN, IEEE 802.11ad, Multi-band, Fast Session Transfer

ABSTRACT

The multi-band wireless local area network (WLAN) using 60 GHz band and the lower band (typically 2.4 GHz/5 GHz band) can support the very high data rate in short-distance communication using 60 GHz band and the long-distance communication using the lower band. For heightening the efficiency of multi-band WLAN, a band selection scheme is a necessity. In this paper, we propose an effective frequency band selection scheme for multi-band WLANs. By using computer simulation with NS-3, we show the performance of the proposed schemes when the stations suffer from the human blockage and the log-normal shadowing.

### I. 서 론

무선랜(WLAN: wireless local area network) 사용이 일반화됨에 따라, WLAN을 통해 다양한 통신 및 방송 서비스를 제공받으려는 요구가 점점증하고 있다.

그 중에서도 무압축 동영상 전송이나 무선 비디오 게임 등의 서비스는 Gbps급의 고속 데이터 전송을 필요로 한다. 고속 전송을 위해서는 넓은 대역폭이 필요한데, 기존의 WLAN이 사용하던 2.4 GHz 또는 5 GHz 비먼허 대역에서는 충분히 넓은 대역폭을 확보하기

\* 본 연구는 한국외국어대학교 교내학술연구비의 지원으로 수행되었습니다.

<sup>o</sup> 본 연구의 일부 결과는 Joint Conference on Communications and Information (JCCI) 2014에서 발표되었습니다[14].

• First Author : Hankuk University of Foreign Studies, Dept. of Electronics Engineering, thjeong@hufs.ac.kr, 학생회원

Corresponding Author : Hankuk University of Foreign Studies, Dept. of Electronics Engineering, dgjeong@hufs.ac.kr, 정회원

논문번호 : KICS2014-08-322, Received August 27, 2014; Revised October 28, 2014; Accepted November 18, 2014

어렵다. 이에 대한 유력한 대안 중 하나가 60 GHz 비면허 대역을 이용하는 방안이다. 최근 60 GHz 비면허 대역에서 동작하는 WLAN과 WPAN(wireless personal area network)에 관한 표준으로 ECMA-387<sup>[1]</sup>, IEEE 802.15.3c<sup>[2]</sup>, IEEE 802.11ad<sup>[3]</sup> 등이 제정되어 왔다.

802.11ad 표준은 60 GHz 대역에서 2.16 GHz의 대역폭을 사용하여 최대 6.75 Gbps의 전송속도를 제공하는 WLAN을 규정하고 있다. 잘 알려진 바와 같이 60 GHz 대역 신호는 2.4 GHz 또는 5 GHz 대역의 신호에 비해 직진성이 강하고 경로손실이 심해 장애물에 취약하고 사용가능 거리가 짧은 단점이 있다. 통신 거리를 증가시키기 위해 대부분의 60 GHz 대역을 사용하는 WLAN(60 GHz WLAN)에서는 빔포밍(beamforming) 기술을 사용하여 안테나 이득을 높인다. 그럼에도 불구하고, 일반적으로 60 GHz WLAN의 서비스 영역은 낮은 주파수 대역에서 동작하는 기존 WLAN에 비해 여전히 작다. 결국 60 GHz 대역을 사용하면 전송속도를 높일 수 있으나 서비스 영역이 작고, 2.4 GHz 또는 5 GHz 대역을 사용하면 서비스 영역은 크지만 상대적으로 높은 전송속도를 제공할 수는 없다.

60 GHz 대역과 낮은 주파수 대역을 모두 사용하는 다중대역 WLAN을 이용하면 두 주파수 대역의 장점을 모두 취할 수 있다. 이를테면 송수신 단말이 충분히 가까우면 60 GHz 대역을 사용하여 Gbps 속도로 통신을 하고 단말 간의 거리가 멀면 낮은 주파수 대역에서 동작하여, 어떠한 경우에도 최적의 전송속도를 제공할 수 있다. 다중대역 WLAN의 또 다른 장점으로, 트래픽의 특성에 따라 적절한 대역을 선택하여 사용함으로써 사용자에게 더 나은 서비스 품질(QoS: quality of service)을 제공할 수도 있다. 예를 들어, VoIP 서비스와 같이 저속이면서 지연시간에 민감한 서비스는 2.4 GHz 또는 5 GHz 대역을 사용하고, 고화질 동영상 스트리밍 서비스와 같이 지속적인 고속 전송이 필요한 서비스는 60 GHz 대역을 사용하는 방법이 있다<sup>[4]</sup>. 시변 채널(time-varying channel) 환경에서 이러한 다중대역 WLAN의 장점을 극대화하려면, 채널 상태의 변화에 따라 WLAN의 동작대역을 적절히 변경하는 효율적인 대역이동 방안이 필수적이다. 셀룰러통신의 핸드오버에 비견되는 다중대역 WLAN의 대역이동에서는 끊임 없는 이동이 무엇보다 중요하다. 이를 지원하는 대역이동 방안에는 대역이동 시기를 판단하는 대역이동 결정 기법과 신속한 대역이동 절차(프로토콜)가 포함된다. 이 둘 중 통신 절차 또

는 프로토콜 자체는 표준화하는 것이 일반적이지만, 대역이동을 수행할지 결정하는 방법은 구현에 관한 문제이다. 본 논문은 효과적인 대역이동 결정 기법을 설계하고 그 성능을 평가하는데 초점을 둔다. 이와 더불어 대역이동 메커니즘의 구현과 관련된 제어프레임의 전송속도 선택 방법에 대해서도 함께 살펴본다. 본 논문의 구성은 아래와 같다.

제2 장에서는 다중대역 WLAN에 관한 기존 연구를 개괄한다. 제3 장에서는 연구 대상 WLAN 모델을 소개하고, 본 논문에서 고려하는 통신 시나리오를 설명한다. 제4 장에서는 제안하는 대역이동 결정 기법과 제어프레임의 전송속도 선택 방법을 설명한다. 제5 장에서는 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 제안된 기법의 성능을 분석을 하고, 제6 장은 이 논문의 결론이다.

## II. 관련 기존 연구

다중대역을 이용하는 방식 중 하나는 2.4 GHz 또는 5 GHz 대역을 제어 용도에 사용하고, 60 GHz 대역을 실제 데이터 전송에 사용하는 것이다. 예를 들어, 60 GHz 대역 WLAN 단말이 지향성 안테나를 사용하려면 통신을 시작하기 전에 상대방 단말과 빔포밍 훈련을 통해 수신 또는 송신 빔을 결정해야 한다. 빔포밍 훈련을 위해서는 먼저 상대방 단말을 탐색해야 하는데, 지향성 안테나를 사용하면 hidden node 문제와 deafness 문제가 발생하고<sup>[5]</sup>, 이로 말미암아 상대방 단말을 찾는데 더 많은 시간과 에너지가 소모된다<sup>[6]</sup>. 이 문제를 해결하기 위해 단말탐색 과정은 2.4 GHz 또는 5 GHz 대역에서 수행하고 데이터 전송은 60 GHz 대역에서 수행하여, 단말 탐색에 소모되는 시간과 에너지 소모를 줄이는 방법이 제안되었다<sup>[7]</sup>.

60 GHz 대역 WLAN/WPAN은 실내를 중심으로 한 아주 좁은 영역의 서비스를 주요 목적으로 한다. 이러한 환경에서는 이동하는 사람이 송수신 단말간의 가시선(LOS, line of sight)을 차단하여 채널이 열화(degradation)되는 일이 잦다. 이러한 현상을 인적 차폐(human blockage)라 한다 (그림 1 참조). 60 GHz 대역 WLAN에서는 차폐로 인한 통신 단절을 줄이는 일이 매우 중요하다. [8]에서는 단말의 처리량과 각 대역에서 동작하는 사용자 수를 이용해 사용대역을 결정함으로써 차폐에 기인한 통신 단절을 줄이는 기법이 제안되었다. 그러나 [8]의 방법은 TDMA를 사용하는 MAC에서 사용가능한 기법이어서 경쟁기반의 MAC에서 사용하기는 어렵다.

WLAN은 아니지만 이와 유사하게 다중대역을 사

용하는 무선 라우터를 위한 전송 큐(queue) 관리 방법이 [9]에서 제안되었다. 이러한 시스템에서 각 대역마다 트래픽 상황이 다르기 때문에 대역별로 독립적인 큐를 사용하게 되면 큐의 효율성이 떨어진다. [9]에서는 어느 한 대역에 트래픽이 집중되어 버퍼 범람(overflow)이 발생하게 되면, 버퍼에 여유가 있는 다른 대역으로 트래픽을 우회시켜 패킷의 지연시간과 패킷 손실을 줄이고 큐의 효율성을 높이는 방법을 제안하였다.

여러 다중대역 WLAN 표준이 한 번에 하나의 주파수 대역에서 동작하도록 설계된 반면, 802.11ad 표준에서는 다중대역 WLAN의 장점을 극대화시켜 사용할 수 있도록 다중대역 동작(multi-band operation)을 정의하고 있다. 802.11ad에 따라 다중대역 동작을 지원하는 단말은 각 대역별로 별도의 MAC과 PHY 기능을 가진다. 또 통신 중 신속한 동작대역이동을 위한 '절차'로서 FST(Fast Session Transfer) 프로토콜을 규정하고 있다<sup>[3]</sup>.

다중대역 WLAN에서 FST 프로토콜이 수행하는 역할은 셀룰러통신 시스템에서 주파수 대역을 변경하는 핸드오버 프로토콜의 역할에 비견할 수 있다. 그런데 표준화된 핸드오버 프로토콜을 사용하는 하나의 셀룰러통신 시스템 내에서도 기지국이나 단말이 핸드오버를 실행할 조건이나 시점을 결정하는 문제는 표준화 대상이 아니라 구현상의 문제이고, 통신시스템의 성능 향상을 위해 다양한 방법이 제안되고 사용되어 오고 있다. 이와 유사하게, 표준화된 FST 프로토콜을 사용하는 다중대역 WLAN에서도 언제 어느 대역으로 이동하는지를 결정하는 문제는 구현상의 문제이므로 별도의 연구를 필요로 한다. 본 연구에서는 낮은 주파수 (2.4 및 5 GHz) 대역과 높은 주파수 (60 GHz) 대역을 함께 사용하는 다중대역 동작 WLAN에서 효율적 대역사용을 가능하게 하는 대역이동 결정 기법을 설계한다. 또 대역이동을 위해 802.11ad의 FST 프로토콜을 사용하는 경우, FST 프레임의 MCS(modulation and coding scheme) 선택 방법을 제안한다. 다중대역 WLAN에 대해서 위에서 살펴본 연구들을 포함한 여러 연구가 진행되어왔지만, 대역이동 결정 기법 자체에 초점을 둔 기존의 연구는 없었다.

### III. 시스템 모델 및 통신 시나리오

본 논문에서는 설명의 편의를 위해 낮은 주파수 대역이 5 GHz 대역이고 높은 주파수 대역이 60 GHz 대역이라 가정한다. 낮은 주파수 대역이 2.4 GHz 대

역인 경우에도 본 논문의 기법은 그대로 적용할 수 있다. 또한 2.4 GHz 대역과 5 GHz 대역은 주파수 스펙트럼 상 인접해 있고 동일한 대역폭의 채널을 사용하고 있기에 양 대역에서 제공하는 전송속도가 유사하다. 이에 따라 2.4 GHz/5 GHz 대역 사이의 이동에는 특별한 기술적 어려움이 따르지 않으므로 이 연구에서는 다루지 않는다.

다중대역 WLAN은 각각 5 GHz 및 60 GHz 대역에 대해 대역별로 별도의 MAC과 PHY 기능을 수행할 수 있는 다수의 다중대역 단말로 구성된다. 단말은 각 대역에서 주기적으로 비콘(beacon)을 전송할 수 있다. 본 논문에서는 60 GHz 대역 WLAN이 주로 사용되는 실내 환경을 고려한다. 또 60 GHz 대역 통신은 주로 강력한 지향성 통신에 기반하는 점을 고려하여, 특별한 언급이 없는 한 다수 단말간의 동시통신보다는 빔포밍을 이용해 교신하는 한 쌍의 단말에 초점을 둔다.

60 GHz 대역 WLAN은 특히 높은 전송속도를 요구하는 응용서비스를 지원하기 위한 것이다. 본 논문에서는 이러한 서비스 시나리오의 한 예로 그림 1에서 보는 바와 같은 무압축 동영상 전송을 고려한다. 송신단말(예컨대 셋톱박스 또는 태블릿 PC)은 WLAN을 통해 수신단말(예컨대 디스플레이)로 고속 동영상 패킷을 연속적으로 보낸다. 송신단말은 AMC(adaptive modulation and coding) 기법을 사용하여 채널상태에 따라 전송속도를 달리한다. 따라서 전송속도를  $R_{rx}(t)$  Mbps라 하면  $R_{rx}(t)$ 는 동작대역과 채널상태에 따라 변한다. 수신단말은 수신한 패킷을 크기가 일정한 수신버퍼에 저장한다. 이 수신버퍼의 크기를  $Q$  Mbits라 하자. 수신단말은 버퍼에 재생할 수 있는 데이터가 남아 있는 한, 일정한 속도로 동영상을 재생한다. 동영상 재생속도를  $R_{pl}$  Mbps라 하자.

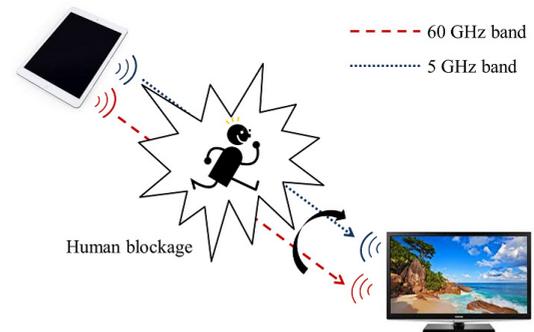


그림 1. 인적 차폐와 대역이동의 예  
Fig. 1. An example scenario of band transfer after human blockage.

두 단말 간 가시선이 차단되지 않고 유지되어 채널 상태가 양호하면 두 단말은 60 GHz 대역에서  $R_{rx}(t) (> R_{pl})$  인 고속통신을 한다. 이러한 상태가 일정시간 이상 유지되면 수신단말의 버퍼는 가득 차게 된다. 이 경우 송수신 단말이 버퍼 범람(overflow)을 막기 위해 적절한 흐름(flow) 제어 등을 수행하여 패킷 상실을 방지함으로써 안정적 동영상 재생을 수행한다고 가정한다. (단, 구체적 흐름제어 방식은 본 연구의 범위를 벗어나므로 이 논문에서 다루지 않는다.)

그런데 전송 도중 그림 1에서 보는 바와 같은 인적 차폐나 그 밖의 이유로 60 GHz 대역의 채널 상태가 나빠지게 되면 전송에러율이 증가하고, AMC를 사용하는 송신단말은 이에 대응하여 MCS(modulation and coding scheme) 수준을 낮춤으로써 (전송속도를 줄여서) 주어진 채널 상태에 대한 최적의 유효 전송속도를 유지하려 한다. 그러나 채널 상태가 심하게 나쁜 경우 MCS 수준을 낮추더라도 통신을 지속할 수 없게 된다. 60 GHz 대역에서는 더 이상 효과적인 전송이 불가능하다고 판단되면, 5 GHz 대역으로 동작대역을 바꾼다. 동작 대역을 바꾼 두 송수신 단말은 5 GHz 대역의 채널로 통신을 지속하면서 주기적으로 60 GHz 대역의 채널 상태를 파악하고, 그 상태가 일정 수준 이상으로 향상되면 동작대역을 다시 60 GHz 대역으로 전환한다. 이와 같이 두 대역 사이의 양방향 대역이동을 효과적으로 수행하려면, (1) 특정 시점에서 대역이동 실행 여부를 판단하는 (달리 말해 대역이동 시점을 결정하는) “대역이동 결정 기법”과 (2) 결정된 대역이동을 실행하기 위한 단말 사이의 절차, 즉 구체적인 “대역이동 프로토콜”이 필요하다. 본 연구에서는 다음 장의 4.1 절에서 단순하고도 효율적인 대역이동 결정 기법을 제안한다. 한편 대역이동 프로토콜은 표준화 대상이 되는 절차이므로 본 연구에서는 802.11ad에 규정된 FST 프로토콜<sup>3)</sup>을 사용한다. 다만 802.11ad의 FST 프로토콜을 실제에서 사용하기 위해서는 제어 프레임의 MCS 수준을 정해야 하는데 이에 대해서는 다음 장의 4.2 절에서 다룬다.

인적 차폐가 발생한 상황에서는 60 GHz 대역 채널에서 낮은 수준의 MCS를 사용하여 전송하던 (대역이동 결정에 따라) 또는 5 GHz 대역 채널을 사용하던, 불가피하게 전송속도가 낮아진다.  $R_{rx}(t)$ 가  $R_{pl}$ 보다 작게 유지되는 동안 수신단말 버퍼의 저장 데이터는 감소한다.  $R_{rx}(t) < R_{pl}$ 가 유지되는 기간을  $T_h$ 라 하자. 버퍼가 가득 차 있다가 완전히 소모될 때 까지 걸

리는 예상시간  $T_s$ 는 다음 식을 만족시키는 값이다.

$$\int_{T_0}^{T_0+T_s} (R_{pl} - R_{rx}(t))dt = Q \quad (1)$$

여기서  $T_0$ 는 처음으로  $R_{rx}(t)$ 가  $R_{pl}$ 보다 작아진 시각이다. 만약,  $T_s < T_h$  이면 버퍼가 모두 소진되어 동영상 재생이 중단되는 일이 발생하고 중단되는 시간을  $T_d$ 라 하면  $T_d = \max[T_h - T_s, 0]$ 이 된다. 재생 중단은 사용자의 QoS에 직접적 영향을 미치므로, 주어진 조건에서 재생 중단 시간을 최소화하도록 하는 것이 다음 장에서 설명하는 대역이동 결정 기법의 설계 목표가 된다.

#### IV. 제안 기법

##### 4.1 대역이동 결정 기법 설계

개념상 대역이동의 조건은 현재의 동작대역에서 가능한 모든 MCS 수준을 비교하여 얻을 수 있는 최고 유효처리량보다 이동해 갈 대역에서 얻을 수 있는 최고 유효처리량이 더 큰 것이다. 그러나 실제 대역이동에서는 제어 신호 교환을 포함한 신호 부담이 있고, 새로운 대역에서 최적 MCS 수준을 찾는 데 시간도 소요된다. 그러므로 실제적인 방법은 60 GHz 대역에서 데이터 전송에 사용되는 MCS 중 전송 속도가 가장 낮은 MCS와 5 GHz 대역에서 사용되는 MCS 중 가장 높은 MCS의 처리량을 비교하여 찾을 수 있다. 실령 이러한 기법을 사용해도 이동해 갈 대역의 처리량을 예측해야 하는데 실제 시변 채널 상황에서 신뢰성 있는 예측은 여전히 어렵다.

다중대역 WLAN의 대역이동은 셀룰러 시스템의 핸드오버와 근본적 유사성이 있으므로, 대역이동 결정 기법 설계에 셀룰러 시스템의 핸드오버 결정 기법을 참조할 수 있다. 여러 가지 방식에 근거한 셀룰러 시스템의 핸드오버 결정 기법이 있으나 가장 흔히 쓰이는 것은 각 기지국으로부터 수신되는 신호의 SINR을 비교하는 것이다. 그런데 60 GHz 대역의 경우 좁은 빔폭을 사용하는 지향성 통신을 하므로 다른 단말로부터의 신호간섭이 현저히 적다. 또 서비스 영역이 매우 작으므로 영역 내에서 각 지점의 기저 잡음의 크기가 비교적 유사하다. 이러한 환경에서는 각 채널을 통한 수신 SINR 대신에 수신신호전력을 판단 기준으로 삼아도 무방하다.

이러한 관찰에 근거하여, 본 논문에서는 60 GHz

대역 수신신호전력에 기반을 둔 대역이동 결정 기법을 제안한다. 60 GHz 대역 수신신호전력을 측정하기 위해 60 GHz 대역을 사용하는 각 단말은 상대 단말로부터 수신되는 모든 패킷에 대해 수신신호전력을 측정한다. 만약 동작대역이 5 GHz 대역이라면 상대방 단말로부터 60 GHz 대역에서 주기적으로 송신되는 비콘을 수신해 수신신호전력을 측정한다. 측정된 60 GHz 대역의 수신신호의 전력을  $P_{rx,60}$ 이라 할 때, 이 값을 미리 정한 임계치  $P_{TH}$ 와 비교해 새로운 동작대역을 결정한다.

(방법 A)  $P_{TH} \leq P_{rx,60}$ 이면 동작대역을 60 GHz 대역으로 결정하고, 반대로  $P_{TH} > P_{rx,60}$ 이면 동작대역을 5 GHz 대역으로 결정한다.

그런데 방법 A를 사용할 경우  $P_{rx,60}$ 와  $P_{TH}$ 의 값이 비슷한 지점에서 채널 페이딩의 영향으로 말미암아 짧은 주기로 동작대역이동을 반복하는 이른바 핑퐁 현상이 생길 수 있다<sup>[10]</sup>. 이를 막기 위해 히스테리시스(hysteresis)를 이용하는 다음 방법도 함께 고려한다.

(방법 B)  $P_{TH} + P_{hys} \leq P_{rx,60}$ 이면 동작대역을 60 GHz 대역으로 결정하고,  $P_{TH} > P_{rx,60}$ 이면 동작대역을 5 GHz 대역으로 결정한다. 여기서  $P_{hys}$ 는 히스테리시스의 크기를 결정하는 파라미터이다.

참고로 (방법 A)는 (방법 B)에서  $P_{hys} = 0$ 으로 설정한 특수한 경우로 볼 수 있다. (방법 A) 또는 (방법 B)를 이용하여 대역이 선택되고, 선택된 대역이 현재의 동작대역과 다르면 FST 프로토콜을 수행하여 새로운 동작대역으로 이동한다.

4.2 60 GHz 대역에서 FST 제어프레임 전송에 사용할 MCS 선택 방법

대역이동을 하기로 결정한 두 단말이 이를 실행할 때 사용하는 프로토콜로서 본 연구에서는 IEEE 802.11ad가 채택한 FST 프로토콜<sup>[3]</sup>을 차용한다. FST 프로토콜의 신호 절차는 그림 2와 같이 크게 Setup 과정과 Ack 과정 둘로 나뉘고 이 과정들이 정상적으로 완료되면 새로운 대역에서 통신을 하게 된다. 먼저 현재 동작 중인 대역에서 FST Setup Request와 FST Setup Response 프레임 교환하는 FST Setup 과정이 이뤄진다. FST Setup 프레임의 교환이 일정시간 동안 정상적으로 이뤄지면 FST Ack 과정이 진행되고 그렇지 않으면 FST 프로토콜은 종료되어 동작 중인 대역에서 계속 통신을 한다. FST Ack 과정은 이동해 가는 새로운 대역에서 FST Ack Request와 FST Ack

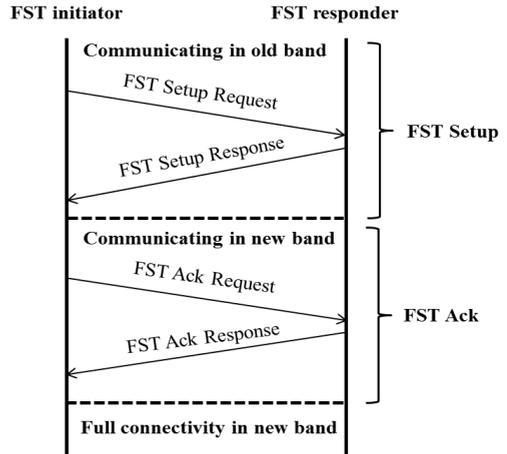


그림 2. FST 프로토콜의 신호 절차<sup>[3]</sup>  
Fig. 2. Signalling procedure of FST protocol<sup>[3]</sup>.

Response 프레임을 교환하는 과정이다. 일정 시간동안 FST Ack 프레임들이 성공적으로 교환되면 새로운 대역에서 통신을 시작한다.

그런데 [3]에서는 FST 프로토콜을 실제로 사용할 때 필요한 제어프레임의 초기 MCS를 결정하는 방법에 대해 언급하지 않고 있다. 802.11ad 표준은 Control PHY, Single Carrier(SC) PHY, OFDM PHY, Low-SC PHY 등 네 가지의 PHY를 정의하고 있다. Control PHY는 주로 비콘, 빔포밍 훈련 프레임 등 작은 크기의 프레임을 전송하는 용도로 사용되고, 나머지 PHY는 주로 데이터 전송에 사용된다<sup>[3]</sup>. Control PHY는 27.5 Mbps 전송속도에 대응되는 MCS 0을 사용하는데 비해, 데이터 전송에 사용되는 MCS 중 가장 낮은 MCS는 SC PHY의 MCS 1로 385 Mbps에 대응된다.

두 방향의 대역 이동에 있어서, 본 연구에서는 다음과 같은 방법으로 MCS의 초기 수준을 결정한다. 먼저 60 GHz 대역을 사용하다가 5 GHz 대역으로 이동하는 경우에는 60 GHz 대역에서 FST Setup 프레임을 전송해야한다. 그런데 60 GHz 대역의 채널 상태가 나빠졌기 때문에 프레임 에러가 발생할 수 있다. 이런 상황을 감안하여 전송 성공 확률이 가장 높은 MCS 0을 사용하여 제어프레임을 전송한다. 한편 5 GHz 대역에서 60 GHz 대역으로 이동할 때에는 60 GHz 대역에서 FST Ack 프레임이 전송되고, FST 신호 교환 절차가 끝나면 60 GHz 대역에서 데이터를 전송한다. 대역이동 초기에는 60 GHz 대역의 정확한 채널 상태를 파악하기 힘들기 때문에 데이터 전송에 사용되는 MCS 중 가장 낮은 MCS 1을 사용한다.

### V. 성능 평가

컴퓨터 시뮬레이션을 이용해 제안된 기법의 성능을 평가한다. 시뮬레이터로는 기본적으로 NS-3<sup>[11]</sup>를 사용하되 추가적으로 필요한 부분은 C++언어로 작성하였다.

#### 5.1 시뮬레이션 설정

연구 대상 다중대역 WLAN은 5 GHz 및 60 GHz 대역에서 동작한다. 먼저 5 GHz 채널의 중심주파수는 5.15 GHz이고 채널 대역폭은 20 MHz이다. 5 GHz 대역에서는 전방향안테나를 사용하고 송신전력은 14 dBm이다. 5 GHz 대역의 경로감쇄에 대해서는 송수신기 사이의 거리만 고려한 아래 모델<sup>[11]</sup>을 사용하였다.

$$\text{Path Loss [dB]} = 10\log_{10}(4\pi/\lambda)^2 + 10n\log_{10}(R) \quad (2)$$

여기서  $n$ 은 경로감쇄지수이고  $\lambda$ 는 중심주파수의 파장이다. 5 GHz 대역에 대해  $n = 3$ 의 값을 사용하였다. 또  $R$ 은 단말간 거리를 나타내며 단위는 미터이다.

60 GHz 채널의 중심주파수는 58.32 GHz이고 채널 대역폭은 2.16 GHz이다. 60 GHz 대역의 수신안테나는 전방향안테나 모델을, 송신안테나는 flat-top 안테나 모델을 사용하였다. 안테나의 빔폭을  $\theta$ 라 할 때, flat-top 안테나 모델의 안테나 main lobe의 이득은  $G = 2\pi/\theta$ 이다. 60 GHz 대역에서의 송신전력은 10 dBm으로 설정하였다. 60 GHz 대역의 경로감쇄는 [12]를 참조하여 다음과 같이 모델링하였다.

$$\text{Path Loss [dB]} = A + 20\log_{10}(f) + 10n\log_{10}(R) + \sigma_X \quad (3)$$

여기서  $A$ 는 통신 환경에 따라 달라지는 경로감쇄의 차이를 반영하는 파라미터이고,  $f$ 는 채널의 중심주파수(GHz) 이며,  $\sigma_X$ 는 전파음영(shadowing)으로 인한 감쇄이다.

60 GHz 대역 WLAN에서는 강력한 지향성 통신을 사용하기 때문에 다른 단말의 신호간섭보다는 전파음영에 따른 신호 차폐가 성능에 더욱 큰 영향을 미친다. 전파음영에 따른 대역이동 기법의 성능을 분석하기 위해서 시뮬레이션에서는 서로 통신하는 한 쌍의 단말만 존재하고 다른 단말에 의한 신호간섭이 없도

록 설정하였다. 다양한 환경에서 제안된 기법의 성능을 분석하기 위해, 인적 차폐로 전파음영이 발생하는 경우와 로그노말(log-normal) 전파음영이 존재하는 경우 등 두 가지로 구분하여 시뮬레이션하였다.

먼저 인적 차폐가 발생한 상황에서 60 GHz 대역의 경로감쇄모델은 [12]의 Conference room STA-STA LOS 시나리오의 모델을 참조해 식 (3)의  $A$ 는 32.5 dB로,  $n$ 은 2로 설정하였다. 인적 차폐 발생 시나리오에서는 송수신 단말의 위치를 고정하였다. 단말 간의 거리는 7 m로, flat-top 안테나의 빔폭은 30°로 설정하였다. 시뮬레이션에서 사용된 인적 차폐 모델은 [12, Figure 102]를 참조하였다. 그림 3의 점선은 실험을 통해 실제 측정된 인적 차폐 현상을 단순화한 모델이다. 이 모델에서는 전파음영의 진행과정이 감쇄가 커지는 구간, 감쇄가 일정한 구간 그리고 감쇄가 다시 작아지는 구간으로 표현된다. 전파음영이 발생하기 시작하는 시점부터 끝나는 시점까지의 시간을  $t_d$ 라 한다.  $A_{mean}$ 은 감쇄가 일정한 구간에서의 감쇄의 크기이다. 감쇄가 커지는 구간과 작아지는 구간의 길이는 각각  $t_{decay}$ 와  $t_{rise}$ 에 의해 정해진다.  $t_{decay}$ 는 전파음영이 발생한 시점부터,  $t_{rise}$ 는 전파음영이 끝나는 시점부터 각각 감쇄의 크기가 미리 정한 값( $A_{th}$ )이 되었을 때까지의 시간을 나타낸다. 네 가지 변수  $t_d$ ,  $A_{mean}$ ,  $t_{decay}$ ,  $t_{rise}$ 는 각각 표 1과 같은 분포를 가지는 랜덤변수이고,  $A_{th}$ 는 3 dB이다<sup>[12]</sup>. 여러 차례 인적 차폐가 발생하는 시뮬레이션에서는 한 차례의 인적 차폐가 끝나는 시점부터 그 다음 인적 차폐가 발생할 때까지의 시간을 1 초로 설정 하였다.

로그노말 전파음영이 발생하는 시나리오에서 경로

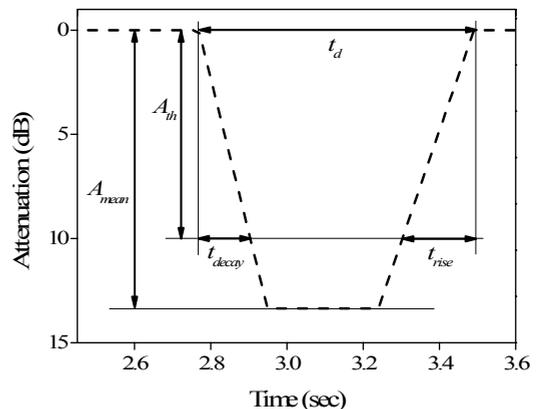


그림 3. 인적 차폐 모델  
Fig. 3. Human blockage model.

표 1. 인적 차폐 모델 파라미터<sup>[12]</sup>  
Table 1. Human blockage model parameters<sup>[12]</sup>.

Parameter	Distribution
$t_d$ [s]	Weibull ( $\lambda = 0.59, k = 6.32$ )
$t_{decay}$ [s]	Weibull ( $\lambda = 0.044, k = 2.07$ )
$t_{rise}$ [s]	Weibull ( $\lambda = 0.045, k = 1.76$ )
$A_{mean}$ [dB]	Gaussian ( $\mu = 13.4, \sigma = 2.0$ )

감쇄 모델은 [12]의 Conference room STA-STA NLOS의 시나리오의 모델을 참조하여, 식 (3)에서  $A$ 는 51.5 dB로  $n$ 은 0.6으로 설정하였다. 로그노말 전파음영의 표준편차는 3.3 dB이고 비상관 (de-correlation) 거리는 5 m이다. Flat-top 안테나의 빔폭은 30°이다. 이 시나리오에서 수신단말은 한 곳에 고정되어 있고 송신단말이 움직인다고 가정하였다. 이 시나리오에서, 송신단말이 수신단말과 일정한 거리를 유지하며 이동하는 경우와, 랜덤워크모델(random walk model)에 따라 이동하는 경우 등 두 가지 경우에 대하여 각각 시뮬레이션을 수행하였다. 전자의 경우, 송신단말은 수신단말과의 거리를 7 m로 유지한 상태로 1 m/s의 일정한 속도로 시계방향으로 원을 그리며 움직인다. 후자의 경우, 크기가 20 m × 20 m인 방의 정중앙에 수신단말이 위치하고 송신단말은 방안에서 이동한다. 송신단말의 초기 위치와 진행방향은 무작위로 정해진다. 송신단말은 2 초마다 방향과 속도를 새로 정한다. 진행하던 방향각에 [-45°, 45°] 구간에 균일분포(uniform distribution)된 랜덤 각도를 더해 새로운 방향을 정한다. 속도는 [1 m/s, 3 m/s] 구간에 균일분포된 랜덤변수 값으로 정해진다. 만약, 송신단말이 벽과 부딪히면, 그 지점에서 반사되어 이동한다.

시뮬레이션에 사용된 MCS 수준의 종류와 MCS 선택 방법은 다음과 같다. 5 GHz 대역 통신에는 802.11a의 MCS 0(6 Mbps)부터 MCS 7(54 Mbps) 및 그 사이의 모든 MCS 수준을 사용하였다. 60 GHz 대역 통신에는 802.11ad 표준에서 의무적 사용을 규정하고 있는 MCS 0부터 MCS 4만을 사용한다. MCS 0은 Control PHY 용도로 데이터 전송에는 사용하지 않고 제어 패킷 전송에만 사용하고, MCS 1(385 Mbps)부터 MCS 4(1155 Mbps)까지는 SC PHY로 데이터 전송에 사용한다. 각 대역에서 데이터 전송에 사용되는 MCS 선택방법은 ARF(Auto Rate Fallback)<sup>[13]</sup>를 사용하였다. 5 GHz 대역에서 전송되는 FST 프레임의 MCS 선택방법은 마지막 데이터 전송에 사용된 MCS를 사용한다.

시뮬레이션에서는 802.11ad의 FST 프로토콜을 사용할 때 발생하는 지연시간을 반영하였다. FST 프로토콜의 수행시간,  $T_{FST}$ 는 식 (4)와 같다.

$$T_{FST} = (T_{S,Req} + T_{SIFS} + T_{ACK}) + (T_{S,Resp} + T_{SIFS} + T_{ACK}) + (T_{A,Req} + T_{SIFS} + T_{ACK}) + (T_{A,Resp} + T_{SIFS} + T_{ACK}) \quad (4)$$

여기서  $T_{S,Req}$ 와  $T_{S,Resp}$ 는 각각 FST Setup Request와 FST Setup Response 프레임의 전송시간이다. 그리고  $T_{A,Req}$ 와  $T_{A,Resp}$ 는 각각 FST Ack Request와 FST Ack Response 프레임의 전송시간을 나타낸다.  $T_{ACK}$ 는 ACK 프레임의 전송 시간이고  $T_{SIFS}$ 는 SIFS(short interframe space) 시간이다. 시뮬레이션에서는 FST 프로토콜을 데이터 전송보다 우선적으로 수행하기 위해서 FST 프레임을 전송할 때 백오프(back-off)를 하지 않고 전송하였다. FST 프로토콜에 사용된 파라미터는 표 2와 같은 값을 사용하였다. 표 2에서 제어프레임의 전송시간은 MAC 헤더와 PHY 헤더 전송시간이 포함된 것이다. 60 GHz 대역에서 5 GHz 대역으로 이동하는 경우, FST Setup 프레임은 60 GHz에서 MCS 0을 사용해 전송되고 FST Ack 프레임은 5 GHz 대역에서 MCS 0을 사용해 전송된다. 이 경우,  $T_{FST}$ 는 320.54  $\mu$ s이다. 반대로 5 GHz에서 60 GHz 대역으로 이동하는 경우에는 FST Setup 프레임은 5 GHz에서 MCS 0을 사용해 전송되고 FST Ack 프레임은 60 GHz 대역에서 MCS 1을 사용해 전송되어  $T_{FST}$ 는 307.2  $\mu$ s가 된다.

MAC으로는 802.11의 DCF을 사용한다. 앞서 4.1 절에서 설명한바와 같이 60 GHz 대역으로의 이동을 결정하기 위해서는 60 GHz 대역에서 송신단말이 수신단말로 전송하는 비콘을 필요로 한다. 시뮬레이션에서 수신단말이 102.4 ms마다 비콘을 전송하도록 설정

표 2. FST 프로토콜 파라미터  
Table 2. FST protocol parameters.

Parameter	60 GHz band		5 GHz band
	MCS 0	MCS 1	MCS 0
$T_{ACK}$ [ $\mu$ s]	11.29	2.8	56
$T_{S,Req}$ [ $\mu$ s]	16.98	2.8	80
$T_{S,Resp}$ [ $\mu$ s]	16.98	2.8	80
$T_{A,Req}$ [ $\mu$ s]	15.52	2.8	64
$T_{A,Resp}$ [ $\mu$ s]	15.52	2.8	64
$T_{SIFS}$ [ $\mu$ s]	3		9

하였다. 송신단말은 항상 보낼 데이터가 있는 상태이고 TCP를 사용해 데이터를 전송한다. TCP의 세그먼트 길이는 1500 bytes이고 최소 재전송 타임아웃 시간은 1 초이다.

1 회(run)의 시뮬레이션 시행에서 시뮬레이션 실행 시간은 실제에서 20 초의 시간에 해당된다. 뒤의 그래프에 사용된 각 결과는 10 회의 시뮬레이션 결과를 평균한 값이다.

### 5.2 수치적 결과

제안한 기법을 비교평가하기 위해 제안한 기법의 대역이동 성능뿐 아니라, 60 GHz 대역만 사용하는 WLAN의 성능을 비교 분석하였다. 대역이동을 위해서는 본 논문에서 제안한 대역이동 결정 기법과 802.11ad의 FST 프로토콜이 사용되었다.

#### 5.2.1 인적 차폐가 발생하는 상황

그림 4는 인적 차폐에 따른 처리량의 변화를 보여 준다. 그림 4는 히스테리시스를 이용하지 않고,  $P_{TH}$ 를  $-70$  dBm으로 설정하였을 때의 결과이다. 인적 차폐가 발생하면 단말의 처리량은 감소하게 되는데, 60 GHz 대역만 사용하는 경우 감쇄가 너무 커져서 거의 모든 패킷에 대해 수신 오류가 발생하므로 처리량이 0이 된다. 반면에 대역이동을 사용하면 처리량이 0이 되기 전에 5 GHz 대역으로 동작대역을 바꾸어 차폐가 발생하는 동안 처리량이 약 22 Mbps로 유지된다. 차폐로 인한 감쇄가 줄어들게 되면 동작대역을 60 GHz로 바꾼다. 60 GHz 대역만 사용한 경우를 보게 되면 처리량이 0으로 유지되는 시간이 차폐가 발생하는 시간보다 긴 것을 볼 수 있다. 그 이유는 60 GHz 대역만 사용한 경우 차폐로 인해 송신단말의 TCP에서는 ACK를 수신하지 못하게 되고, 차폐 상황

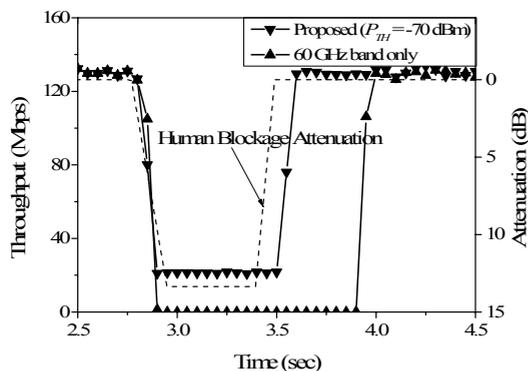


그림 4. 인적 차폐로 인한 처리량의 변화  
Fig. 4. Throughput variation due to human blockage.

이 해소된 후에도 TCP 재전송 타임아웃이 발생할 때까지 TCP에서는 재전송을 하지 않기 때문이다.

이 결과, 그림 5에서 보는 바와 같이 대역이동을 하면 60 GHz 대역만 사용하는 경우 보다 더 좋은 성능을 얻을 수 있다. 그림 5는 히스테리시스를 이용하지 않을 때, 대역이동 결정 시 사용하는  $P_{TH}$ 에 따른 평균 동영상 단절 시간  $E[T_d]$ 를 나타낸다.  $P_{TH}$ 가 너무 작으면 주로 60 GHz 대역에서 동작하고 반대로 너무 크면 주로 5 GHz 대역에서 동작하게 되어 대역이동을 하지 않는 경우와 같아지게 된다.  $P_{TH}$ 가 증가함에

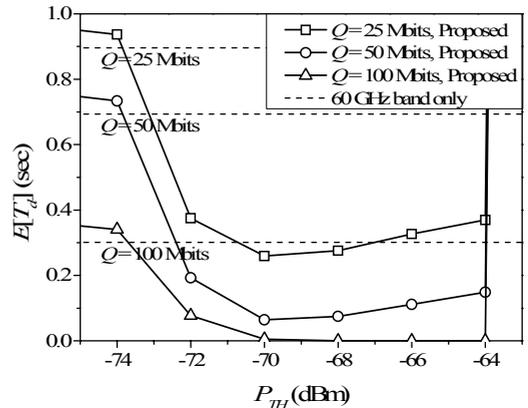


그림 5. 인적 차폐가 발생하는 상황에서 히스테리시스를 이용하지 않는 기법을 적용할 때,  $P_{TH}$ 와  $Q$ 의 크기에 대한 평균  $T_d$  ( $R_{pl} = 130$ )  
Fig. 5. Average  $T_d$  according to  $P_{TH}$  and  $Q$  in human blockage scenario (without hysteresis,  $R_{pl} = 130$ ).

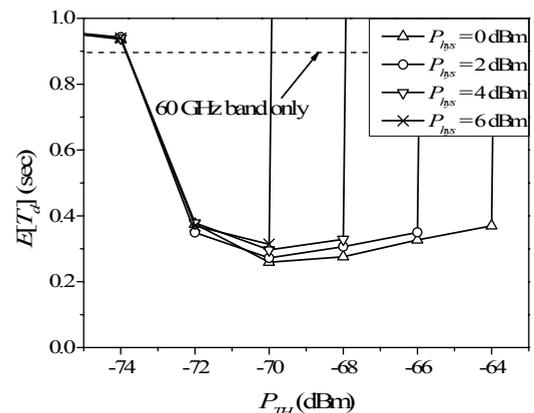


그림 6. 인적 차폐가 발생하는 상황에서 히스테리시스를 이용하는 기법을 적용할 때,  $P_{TH}$ 와 히스테리시스의 크기에 따른 평균  $T_d$  ( $R_{pl} = 130$ ,  $Q = 25$ )  
Fig. 6. Average  $T_d$  according to  $P_{TH}$  and hysteresis in human blockage scenario (with hysteresis,  $R_{pl} = 130$ ,  $Q = 25$ ).

표 3. 인적 차폐환경에서  $t_d$ ,  $t_{decay}$ ,  $t_{rise}$ 에 사용된 weibull 분포의  $\lambda$ 와  $k$ 의 변화에 따른 최적  $P_{TH}$ 의 변화 ( $P_{hys} = 0$ ,  $R_{pl} = 130$ ,  $Q = 25$ ,  $A_{mean} = \text{Gaussian}(\mu = 13.4, \sigma = 2.0)$ ,  $A_{th} = 3\text{dB}$ )  
 Table 3. Optimal  $P_{TH}$  according to  $\lambda$  and  $k$  of weibull distribution for  $t_d$ ,  $t_{decay}$ , and  $t_{rise}$  in human blockage scenario ( $P_{hys} = 0$ ,  $R_{pl} = 130$ ,  $Q = 25$ ,  $A_{mean} = \text{Gaussian}(\mu = 13.4, \sigma = 2.0)$ ,  $A_{th} = 3\text{dB}$ ).

Scenario	Parameter	Distribution	Optimal $P_{TH}$ [dBm]
Slow human blockage	$t_d$ [s]	Weibull ( $\lambda = 1.1, k = 12.5$ )	-72
	$t_{decay}$ [s]	Weibull ( $\lambda = 0.09, k = 4.5$ )	
	$t_{rise}$ [s]	Weibull ( $\lambda = 0.095, k = 4$ )	
Nominal human blockage	$t_d$ [s]	Weibull ( $\lambda = 0.59, k = 6.32$ )	-70
	$t_{decay}$ [s]	Weibull ( $\lambda = 0.044, k = 2.07$ )	
	$t_{rise}$ [s]	Weibull ( $\lambda = 0.045, k = 1.76$ )	
Fast human blockage	$t_d$ [s]	Weibull ( $\lambda = 0.3, k = 2.9$ )	-66
	$t_{decay}$ [s]	Weibull ( $\lambda = 0.02, k = 1.035$ )	
	$t_{rise}$ [s]	Weibull ( $\lambda = 0.02, k = 0.9$ )	

따라  $E[T_d]$ 는 감소하다가 다시 증가하므로 성능을 최대 화시키는  $P_{TH}$ 가 존재한다. 시뮬레이션 환경과 상응하는 환경에서는 그 값이 -70 dBm 근방임을 알 수 있다.

그림 6은 인적 차폐 상황에서 히스테리시스가  $E[T_d]$ 에 어떤 영향을 미치는지 보여주는 그림이다. 그림 6은  $Q$ 가 25 Mbits일 때, 히스테리시스의 크기에 따른  $E[T_d]$ 를 측정할 결과이다.  $P_{TH}$ 가 -70 dBm일 때,  $P_{hys}$ 가 커질수록  $E[T_d]$ 가 증가하는 모습을 볼 수 있다. 히스테리시스를 이용하지 않았을 때( $P_{hys} = 0$ ) 보다  $P_{hys} = 6$  dBm일 때 약 55 msec 정도 크다. 시뮬레이션 환경과 상응하는 환경에서  $P_{TH} + P_{hys}$ 가 -62 dBm보다 커지면 5 GHz 대역으로 이동 후 60 GHz 대역으로 복귀하지 않았다.

5.2.2 로그노말 전파음영 환경

그림 7과 그림 8은 로그노말 전파음영을 겪는 상황에서  $P_{TH}$ 와  $P_{hys}$ 가 처리량에 미치는 영향을 보여준다. 그림 7은 송수신 단말간의 거리를 일정하게 움직이는 경우이고 그림 8은 송신단말이 랜덤하게 움직이는 경우의 결과이다.

두 경우 모두 인적 차폐가 발생하는 경우와 마찬가지로 60 GHz 대역만 사용할 때보다 대역이동 기법을 사용할 때 더 우수한 처리량 성능을 얻을 수 있다. 인적 차폐가 발생하는 경우와 마찬가지로  $P_{TH}$ 가 너무 작으면 5 GHz 대역에서 동작하려하고 너무 크면 60 GHz 대역에서 동작하려하기 때문에 최적  $P_{TH}$ 가 존재한다. 그림 7과 그림 8에서 히스테리시스를 이용하지 않을 때의 처리량을 살펴보면, 두 경우 모두 최적

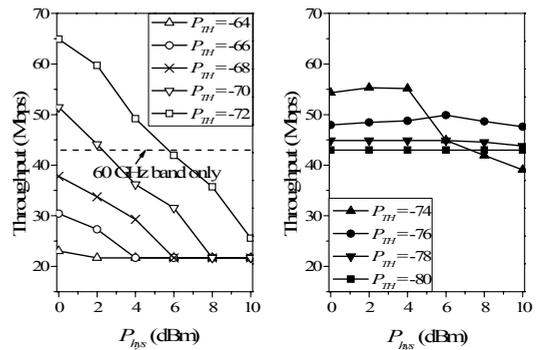


그림 7. 로그노말 전파음영 환경의 송신단말이 수신단말과 일정한 거리를 유지하며 이동하는 경우에서  $P_{TH}$ 와 히스테리시스의 크기에 따른 처리량  
 Fig. 7. Throughput according to  $P_{TH}$  and hysteresis under log-normal shadowing with fixed distance between transmitter and receiver.

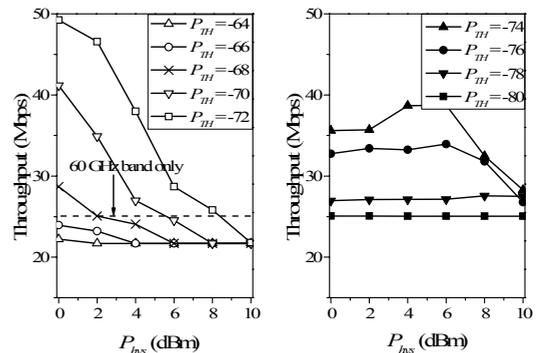


그림 8. 로그노말 전파음영 환경의 송신단말이 랜덤워크모델에 따라 이동하는 경우에서  $P_{TH}$ 와 히스테리시스의 크기에 따른 처리량  
 Fig. 8. Throughput according to  $P_{TH}$  and hysteresis under log-normal shadowing with random walk model.

$P_{TH}$ 가  $-72$  dBm임을 알 수 있다.

그림 7과 그림 8을 살펴보면, 인적 차폐가 발생하는 경우보다 로그노말 전파음영을 겪는 환경에서  $P_{hys}$ 가 처리량에 크게 영향을 미치는 것을 볼 수 있다.  $P_{hys}$ 가 커질수록 처리량은 감소하는데, 그 이유는 5 GHz 대역에서 60 GHz 대역으로 이동할 때  $P_{hys}$ 가 커지면 그만큼 60 GHz 대역으로 이동하기 어려워져서, 결국 더 오랜 기간 5 GHz 대역에서 동작하게 되어 처리량이 감소한다.

### 5.2.3 전파음영 환경이 최적 $P_{TH}$ 에 미치는 영향

표 3은 인적 차폐모델의 파라미터  $t_d$ ,  $t_{decay}$ ,  $t_{rise}$ 에 사용된 weibull 분포(즉  $\lambda$  및  $k$ )에 따른 최적  $P_{TH}$ 의 변화를 보여준다. 표 3에서 ‘통상적(nominal) 인적차폐’는 [12]에서 제시된 인적 차폐모델의 분포를 사용한 경우이다. ‘저속(slow) 인적차폐’는 천천히 이동하는 사람에 의해 차폐가 발생하는 상황을 가정한 것으로 ‘통상적 인적차폐’에 비해 평균적으로 감쇄가 천천히 증가하고 단말이 전파음영을 겪는 시간이 길다. ‘고속(fast) 인적차폐’는 반대로 빠르게 이동하는 사람에 의해 발생하는 차폐를 가정한 것으로 평균적으로 감쇄가 빠르게 진행되고 전파음영 지속시간이 짧다. ‘저속 인적차폐’의 경우 최적  $P_{TH}$ 가  $-72$  dBm으로 가장 작고 ‘고속 인적차폐’에 대응하는 최적  $P_{TH}$ 는  $-66$  dBm으로 가장 크다.

‘고속 인적차폐’의 경우에  $P_{TH}$ 가 너무 작으면 적당한 때 대역이동을 하지 못해서 대역이동전에 데이터 전송 실패가 발생하고 TCP의 재전송 매커니즘이 동작한다. 이 경우에는 대역이동을 하고나서도 TCP 재전송 타임아웃이 발생하기 전까지 데이터 전송시도를 하지 않기 때문에 그 기간 처리량이 0이 된다. 따라서 이러한 환경에서는 선제적 대역이동 수행을 위해서  $P_{TH}$ 가 커야한다. 반면에 ‘저속 인적차폐’의 경우에는  $P_{TH}$ 가 작아도 적절한 대역이동 시기를 결정할 수 있다. 따라서  $P_{TH}$ 가 작아야 60 GHz 대역에서 5 GHz 대역으로 이동하는 시기가 늦어지고 60 GHz 대역에서 동작하는 시간이 길어져서 더 좋은 성능을 얻는다.

표 4는 로그노말 전파음영 환경의 송수신 단말간의 거리가 일정한 경우에서 비상관 거리가 최적  $P_{TH}$ 에 미치는 영향을 보여준다. 비상관 거리가 0.25, 0.5 m 인 경우 최적  $P_{TH}$ 는  $-70$  dBm이고 1 m 이상인 경우에는 최적  $P_{TH}$ 가  $-72$  dBm이다. 비상관 거리가 짧다

표 4. 로그노말 전파음영이 발생하는 상황의 송신단말이 수신단말과 일정한 거리를 유지하며 이동하는 경우에서 비상관 거리에 따른 최적  $P_{TH}$ 의 변화 ( $P_{hys} = 0$ )

Table 4. Optimal  $P_{TH}$  according to de-correlation distance under log-normal shadowing when transmitter is moving kept the distance from receiver ( $P_{hys} = 0$ ).

De-correlation Distance [m]	Optimal $P_{TH}$ [dBm]
0.25	-70
0.5	-70
1	-72
5	-72

는 것은 채널의 상태가 급격히 변하는 환경에 대응되고, 반대로 길다는 것은 상태가 천천히 변하는 환경에 대응된다. 따라서 비상관 거리가 길면 표 3의 ‘저속 인적차폐’에서와 같은 이유로 최적  $P_{TH}$ 가 작다. 반대로, 비상관 거리가 짧으면 표 3의 ‘고속 인적차폐’ 상황과 같은 이유로 최적  $P_{TH}$ 는 커진다.

## VI. 결 론

본 논문에서는 다중대역 WLAN을 위한 대역이동 결정 기법과 FST 제어프레임의 MCS 선택 방법을 제안하였다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 제안한 기법의 처리량과 평균 동영상 단절시간의 성능을 보였다. 그 결과 대역이동 기법을 사용하면 60 GHz 대역에서만 동작하는 경우보다 월등한 성능을 보이고, 특히 성능을 극대화하는 최적  $P_{TH}$ 가 있음을 밝혔다. 한편 히스테리시스를 크게 할수록 핑퐁 현상은 줄어들지만 5 GHz 대역에서 동작하는 시간이 길어져 전체 성능을 현저히 저하되었다. 따라서 실제로 제안된 대역이동 결정 기법을 사용할 때는, 히스테리시스를 이용하지 않는 대신, 예컨대 세션 당 대역이동 회수를 제한하여 핑퐁 현상을 막는 것이 더 나은 방법이 될 것이다. 또한, 전파음영의 상태가 최적  $P_{TH}$ 에 미치는 영향을 분석하였다. 채널이 천천히 변하는 환경에서는  $P_{TH}$ 를 작게 설정하고 빠르게 변하는 환경에서는 선제적 대역이동을 위해  $P_{TH}$ 를 크게 설정해 더 좋은 성능을 얻을 수 있다.

## References

[1] ECMA, High Rate 60 GHz PHY, MAC and PALs, Std. ECMA-387, Retrieved Aug., 2, 2014, from <http://www.ecma-international.org/>

- publications/standards/Ecma-387.htm.
- [2] IEEE, Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for High Rate Wireless Personal Area Network (WPANs) - Amendment 2: Millimeter-wave based Alternative Physical Layer Extension, IEEE Std. 802.15.3c, Sept. 2009.
- [3] IEEE, Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications - Amendment 3: Enhancements for Very High Throughput in the 60 GHz Band, IEEE Std. 802.11ad, Dec. 2012.
- [4] K. Mandke and S. M. Nettles, "A dual-band architecture for multi-Gbps communication in 60 GHz multi-hop networks," in *Proc. ACM mmCom 2010*, pp. 9-14, Chicago, USA, Sept. 2010.
- [5] W. Na and S. Cho, "Performance analysis of contention based directional MAC protocol," *J. KICS*, vol. 36, no. 7, pp. 827-833, Jul. 2011.
- [6] M. Kim and W. Lee, "Analysis of neighbor discovery process with directional antenna for IEEE 802.15.3c," *J. KICS*, vol. 37, no. 1, pp. 9-14, Jan. 2012.
- [7] H. Park, Y. Kim, T. Song, and S. Pack, "Multi-band directional neighbor discovery in self-organized mmWave ad-hoc networks," *IEEE Trans. Veh. Tech.*, no. 99, Jun. 2014.
- [8] J. Qiao, X. Shen, J. W. Mark, Z. Shi, and N. Mohammadzadeh, "MAC-layer integration of multiple radio bands in indoor millimeter wave networks," in *Proc. IEEE WCNC 2013*, Shanghai, China, Apr. 2013.
- [9] Md. S. Hossain, H. S. Narman, and M. Atiquzzaman, "A novel scheduling and queue management scheme for multi-band mobile routers," in *Proc. IEEE ICC 2013*, Budapest, Hungary, Jun. 2013.
- [10] K. Cho and D. H. Kim, "Cell management and handover method in IEEE 802.16e-based femto-cell systems," *J. KICS*, vol. 36, no. 3, pp. 240-249, Mar. 2011.
- [11] Network Simulator-3, Retrieved Aug., 1, 2014, from <http://www.nsnam.org>.
- [12] A. Maltsev, et al., "Channel models for 60 GHz WLAN systems," IEEE 802.11ad Contrib. 09/0334r8, May 2010.
- [13] A. Kamerman and L. Monteban, "WaveLAN-II: A high-performance wireless LAN for the unlicensed band," *Bell Labs Tech. J.*, vol. 2, no. 3, pp. 115-133, 1997.
- [14] T. H. Jeong and D. G. Jeong, "Frequency band selection scheme for WLAN using 5 GHz/60 GHz," in *Proc. KICS JCCI 2014*, Yeosu, Korea, Apr. 2014.

**정 태 훈 (Tae Hun Jeong)**



2013년 2월 : 한국외국어대학교  
전자공학과 학사  
2013년 3월~현재 : 한국외국어  
대학교 대학원 전자정보공학  
과 석사과정  
<관심분야> 무선 네트워크, 다  
중대역 무선랜

**정 동 근 (Dong Geun Jeong)**



1983년 : 서울대학교 제어계측 공  
학과 학사  
1985년 : 서울대학교 제어계측 공  
학과 석사  
1993년 : 서울대학교 제어계측 공  
학과 박사(통신)  
1986년~1990년 : 한국데이터 통  
신 주임연구원

1994년~1997년 : 신세기통신 기술연구소 연구팀장  
1997년~현재 : 한국외국어대학교 전자공학과 교수  
<관심분야> 이동통신시스템, 자원관리, 성능평가