

# IEEE 802.11ac/ad 무선 LAN의 적응형 MCS 구현 연구

이 하 철\*

## Implementation of Adaptive MCS in The IEEE 802.11ac/ad Wireless LAN

Ha-cheol Lee\*

### 요 약

본 연구에서는 초고속 WLAN(Wireless LAN)인 IEEE 802.11ac 및 802.11ad 에서 처리율 향상을 위한 전송률 제어기법과 이에 따른 MCS(Modulation and Coding Scheme)의 적용방안을 제시한다. IEEE 802.11ac 및 802.11ad 표준은 기존의 IEEE 802.11b/g/a 무선 LAN표준과는 달리 송신측이 시간적으로 변하는 채널조건에 따라 전송율을 제어하여 처리율을 높일 수 있도록 하기 위해 많은 MCS 기능을 지원한다. 그러나 이들 표준에서는 전송율을 제어할 수 있는 알고리즘을 제시하고 있지 않으므로 본 연구에서는 전송율 제어 알고리즘에 대하여 살펴보고 MCS의 적용 방안을 제시한다. 특히 IEEE 802.11ac 무선 LAN의 DCF 처리율 성능을 에러를 갖는 채널 환경하에서 분석하기 위해 A-MPDU 기법이 활용되었고 패킷 에러율, 단말장치의 수, 프레임의 수, 프레임 페이로드 크기 및 전송 확률이 변수로 사용되었다.

**Key Words** : Wireless LAN, MCS, IEEE 802.11ac, IEEE 802.11ad, Rate Adaptation

### ABSTRACT

This paper analyzes the rate adaptation scheme and suggests applicable strategy of the MCS(Modulation and Coding Scheme) for improving DCF throughput in the IEEE 802.11ad and 802.11ac wireless LAN. IEEE 802.11ac and 802.11ad wireless LAN provide MCS technique that dynamically adjusts modulation level and code rate to the time-varying channel conditions in order to obtain considerably high data rates. But these standards did not provide rate adaptation algorithm, so this paper surveyes rate adaptation algorithm and suggests MCS scheme applied to IEEE 802.11ac and 802.11ad wireless LAN. Specially A MAC(Medium Access Control) layer throughput is evaluated over error-prone channel in the IEEE 802.11ac-based wireless LAN. In this evaluation, DCF (Distributed Coordination Function) protocol and A-MPDU (MAC Protocol Data Unit Aggregation) scheme are used. Using theoretical analysis method, the MAC saturation throughput is evaluated with the PER (Packet Error Rate) on the condition that the number of station, transmission probability, the number of parallel beams and the number of frames in each A-MPDU are variables.

### I. 서 론

무선 LAN은 IEEE 802. 11b 표준화에 이어 최대

54 Mbps의 전송률을 지원하는 5 GHz 대역의 IEEE 802.11a 및 2.4 GHz 대역의 IEEE 802.11g 무선 LAN 도 상용화된지 오래되었다. 2009년에는 MIMO-OFDM

\* 본 연구는 2012년도 유한대학교 학술연구비 지원으로 수행되었음.

• First Author : Yuhan University Department of Information and Telecommunication, hcleee@yuhan.ac.kr, 종신회원  
 논문번호 : KICS2015-05-141, Received May 6, 2015; Revised June 24, 2015; Accepted July 20, 2015

(Multiple-Input Multiple-Output Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 방식의 IEEE 802.11n도 표준화되어 제품이 시장에 소개되고 있고 IEEE 802.11b/g/a/n 기술을 기반으로 하여 2012년도에 기가비트 무선 LAN인 IEEE 802.11ad, 2013년도에 IEEE 802.11ac 의 표준화가 완료되었다<sup>[1-3]</sup>. 기존 IEEE 802.11b/g/a 물리계층의 전송속도인 11 Mbps나 54 Mbps와 달리 IEEE 802.11n은 MAC-SAP (Medium Access Control-Service Access Point)에서 100 Mbps 이상의 실효 전송속도를 목표로 하고 있다. 이러한 실효 전송속도를 제공하기 위해서는 물리계층에서 140 Mbps ~ 600 Mbps의 전송속도를 갖는다<sup>[1,4]</sup>. 이미 상용화된 기존 무선 LAN 중에서 가장 우수한 성능을 갖는 IEEE 802.11n에도 불구하고 WFA(WiFi Alliance)의 분석에 의하면 압축되지 않는 비디오, 예를 들어 1920×1080 픽셀, 24 비트/픽셀, 초당 60 프레임 정도의 1080p급 비디오를 전송하려면 1 Gbps 이상의 전송속도를 필요로 한다고 언급하고 있다. 즉, IEEE 802.11n에서 제시하고 있는 PHY(Physical) 계층에서의 최대 성능인 600 Mbps는 이미 이러한 요구사항을 만족시킬 수 없다는 얘기다. 이러한 상황에서 신규 표준인 IEEE 802.11ac는 5 GHz 대역을 사용하는 VHT(Very High Throughput) 서비스를 지칭하는 것으로 1 Gbps 이상의 전송속도를 지원하는데 필요한 80 MHz 이상의 주파수 대역을 제공하기 위하여 기존의 무선 LAN 중에서 2.4 GHz를 사용하는 802.11b 및 802.11g와의 호환성을 포기하였다<sup>[2]</sup>. IEEE 802.11ad는 60 GHz에서 동작하는 무선 LAN으로서 7 GHz의 대역폭 사용이 가능하며 각각의 채널이 2.16 GHz인 4개의 채널을 갖추고 있다<sup>[3]</sup>. 그림 1은 IEEE802.11 PHY 계층의 진화계통도, 표 1은 IEEE 802.11b/g/a/n/ac/ad 표준기술을 요약하여 비교한 것을 나타낸다<sup>[1-5]</sup>.

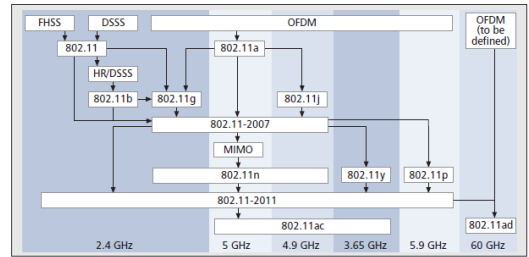


그림 1. IEEE 802.11 PHY 계층의 진화계통도  
Fig. 1. IEEE 802.11 PHY layer amendments and their dependencies

본 논문에서는 기존의 무선 LAN인 IEEE 802.11b, 802.11a, 802.11g 및 802.11n과는 달리 초고속 무선 LAN인 IEEE 802.11ac 및 802.11ad에 적용되어 처리율을 향상시킬 수 있는 전송율 제어 알고리즘과 MCS 기법에 대하여 분석하고 이들 기법의 적용방안을 제시한다.

## II. IEEE 802.11ac/ad 무선 LAN

### 2.1 IEEE 802.11ac<sup>[6]</sup>

IEEE 802.11ac는 2.4 GHz를 제외한 6 GHz 이하의 주파수 대역(5 GHz의 비허가 대역)에서 동작하여 VHT 성능을 갖는 IEEE 802.11 계열의 무선 LAN이다. 현재 여러 IEEE 802.11b/g/n 디바이스는 2.4 GHz대에서 동작하는데 채널 사용율이 높아 대역폭 부족현상이 발생하여 신호간섭이 높으나 5GHz 대역은 상대적으로 신호 간섭이 낮다. 5 GHz 대역에서 20 MHz 대역폭을 갖고 겹쳐지지 않는 채널 수(미국에서는 24개 채널)는 2.4 GHz 대역에서 겹쳐지지 않는 채널의 수(미국에서는 3개 채널)보다 더 크므로 2개 채널 이상을 분당할 수 있다. IEEE 802.11ac는 40 MHz, 80 MHz 및 160 MHz 채널 대역폭을 갖는다. 160 MHz

표 1. IEEE 802.11b/g/a/n/ac/ad의 주요 특징 비교  
Table 1. IEEE 802.11b/g/a/n/ac/ad characteristics

Feature	802.11b	802.11g	802.11a	802.11n	802.11ac	802.11ad
Release year	1999.7	2003.6	1999.7	2010.3	2013.12	2012.12
Theoretical maximum data rate	11 Mbps	54 Mbps	54 Mbps	600 Mbps	1 Gbps	6 Gbps
Modulation	DSSS, CCK	DSSS, CCK, OFDM	OFDM	DSSS, CCK, OFDM	OFDM	OFDM
Spectrum	2.4 GHz	2.4 GHz	5 GHz	2.4 GHz, 5GHz	5GHz	60GHz
Spatial streams	1	1	1	1, 2, 3, 4	4, 5	4, 5
Channel bandwidth	20 MHz	20 MHz	20 MHz	20 MHz, 40MHz	80 MHz	400MHz

채널 대역폭은 인접해 있거나 인접하지 않을 수 있는 2개의 80 MHz 채널로 구성된다. 80 MHz 및 40 MHz 채널은 각각 2개의 인접 40 MHz 및 20 MHz 채널로 구성된다. 40 MHz 및 80 MHz 채널 대역폭은 의무사항인 반면 160 MHz 및 80 + 80 MHz 채널 대역폭은 선택사항이다. IEEE 802.11ac는 single-user MIMO(SU-MIMO) 뿐만 아니라 multi-user MIMO(MU-MIMO) 기능을 제공한다. SU-MIMO는 AP가 단일 디바이스에 여러개의 독립 스트림을 동시에 전송할 수 있는 방법이다. MU-MIMO는 AP가 여러 디바이스에 여러개의 독립적인 스트림을 동시에 전송할 수 있는 방법이다. IEEE 802.11ac에서 MU-MIMO 시스템은 사용자당 4개까지의 공간 스트림을 4명의 사용자에게 제공하는데 최대 8개까지의 공간 스트림으로 제한된다. 현재 많은 가입자 단말장치는 1개의 송신 및 수신 안테나를 갖는 반면 AP는 m개의 송신 안테나 및 n개의 수신 안테나를 갖는다. MU-MIMO 시스템은 AP로부터의 하향링크에 적합하며 네트워크 성능이 개선되고 사용자 단말은 1개의 수신 안테나만을 사용함으로써 단말장치의 복잡도가 최소화된다.

### 2.2 IEEE 802.11ad 무선 LAN<sup>[6]</sup>

IEEE 802.11ad는 60 GHz 대에서 동작하며 수 기가바이트의 처리율을 갖는 무선 LAN 규격이다. 60 GHz 대는 2.4 GHz대의 83.5MHz 스펙트럼에 비하여 7 GHz의 스펙트럼을 제공한다. 이 표준은 4개의 채널을 정의하고 각 채널은 2.16 GHz의 대역폭을 제공하며 이는 IEEE 802.11n의 40 MHz 채널 대역폭보다 54배 정도가 더 넓다. 60 GHz 대에서는 신호 감쇄가 심하고 링크 버짓이 주요 고려사항이 되는데 수신기에서 신호 강도를 개선하기 위해서 고 이득 안테나가 구축되며 대부분 위상배열 안테나인 이러한 고이득 안테나는 송신 전력을 집중시키기 위하여 특정 방향으로 빔을 형성하는 빔포밍 기술을 이용한다. IEEE 802.11ad는 60 GHz 주파수대에서 동작하므로 기존의 무선 LAN기술과 호환성이 없다.

## III. 기존의 전송을 제어방법 분석

### 3.1 제어 알고리즘의 필요성

IEEE 802.11n/ac/ad 표준에서는 처리율을 향상시키기 위해 전송율을 제어할 수 있는 알고리즘을 제시하고 있지 않아서 많은 알고리즘들이 개발되고 있는 실정이다. 개발되고 있는 알고리즘의 대부분은 채널의 통

표 2. 통계기반 및 신호기반 접근방법<sup>[7]</sup>  
Table 2. Statistic-Based vs. Signal-Based Approaches

Statistic-based Approaches	Signal-based Approaches
ARF, AARF, ONOE, Sample Rate	CHARM, RBAR, OAR, Goodput Analysis
collect transmission statistics	measure the signal strength
not require RTS/CTS	may require RTS/CTS
no changes to standard	need changes to standard
performance degradation in many cases	good performance (if neglect the overhead)

계 피드백 데이터나 ACK 메시지의 수신 방식에 근거를 두고 있다. 이러한 알고리즘은 동작속도가 근본적으로 느린데 이용자의 이동성이 높거나 링크조건이 급격히 열화될 때 통신시 drop-out 현상이 발생할 수 있다. 단기적인 drop-out 현상은 패킷지연시간이 증가할 수 있는 패킷 재전송기법에 의해서 제어 가능하다. 이러한 문제는 데이터 다운로드 응용서비스인 경우에는 수용 가능하지만 스트리밍 응용서비스에 적용하는 경우에는 서비스 품질 유지에 결정적인 영향을 미친다. 따라서 멀티미디어 서비스 제공시 QoS(Quality of Service)를 위한 새로운 데이터율 제어 알고리즘이 필요하다.

채널품질 예측을 위해서 사용된 CSI (Channel State Information)에 근거하여 RA(Rate Adaptation)는 두가지로 구분된다. 첫 번째 것은 통계기반 RA 알고리즘으로서 ARF, AARF, SampleRate 및 ONOE가 있고 두 번째 것은 신호기반 알고리즘으로서 CHARM, RBAR, OAR 및 Goodput Analysis가 있다. 하이브리드 접근방법이 제시되기도 하는데 이 방법은 멀티미디어 응용서비스의 성능을 향상시키기 위하여 수집된 전송통계 데이터 및 측정된 RSSI(Received Signal Strength Information) 데이터를 이용한다. 기존의 802.11 표준은 open-loop RA만 지원하고 802.11n 표준은 point-to-point 링크에서의 성능을 최적화하기 위하여 open-loop 및 closed-loop RA기법을 지원한다. open-loop 기법은 송신기와 정해진 수신기 사이에 링크 품질을 예측하기 위하여 ACK 패킷을 모니터링함으로써 implicit 피드백 정보에 근거를 두고 있다. 한편 closed-loop 기법은 제어 패킷에 포함된 explicit 피드백 정보에 근거를 둔다. 이 경우에 수신기는 송신기가 최적의 MCS를 선택하도록 순간적으로 예측 CSI값을 제공한다<sup>[8,9]</sup>.

### 3.2 ARF(Auto Rate Fallback)<sup>[7]</sup>

IEEE 802.11 시스템에서 수신측은 모두 성공적으

로 수신된 데이터 프레임에 대해 송신측에 ACK 프레임 보냄으로서 정상수신 여부를 통보한다. 그러므로 연속적으로 수신된 ACK 프레임의 수는 현재의 채널 상태를 측정할 수 있는 수단이 된다.

- 데이터율은 한 번에 한 단계의 변화 발생
- 3개의 임계값으로 데이터율 증가 및 감소 결정 : step-up 임계값(Ni), fall-back 임계값(Nd), probation 임계값(Np)
- Ni개의 ACK 메시지가 연속적으로 수신되면 전송율이 한 단계 증가
- Nd개의 ACK 메시지가 누락되면 전송율이 한 단계 감소
- 전송율이 증가할 때 새로운 전송율로 변화하기 전에 probation 상태 사용

다음 단계에서 Np개의 ACK 메시지가 모두 수신되면 현재의 전송율은 유지되고 그렇지 않으면 이전의 낮은 전송율로 감소된다.

3개 임계값의 설정은 링크와 응용서비스에 의존하지만 실제적으로 고정적인 임계값이 설정된다. ARF 알고리즘은 단지 3개의 임계값을 사용함으로써 쉽게 구현될 수 있지만 전송율이 한 단계만 증가하거나 감소하기 때문에 링크에 대한 적응속도가 느리다는 단점이 있다. 전송율 천이시간은 초기의 MCS 설정값에 달려 있다. 따라서 ARF 알고리즘은 급격한 페이딩 채널 환경에서 성능이 열악하다. 게다가 짧은 에러 버스트가 발생할 때 처리율 손실을 유발한다. 이는 높은 전송율로 이동하는 것은 발진 현상을 방지하고 채널 통계 데이터를 수집해야 할 필요성으로 인해 낮은 전송율로 이동하는 것보다 훨씬 더 긴 시간을 필요로 하기 때문이다. 이것 이외에도 QoS의 중요한 역할을 하는 PER(Packet Error Rate)의 조건을 만족시키는 3가지 최적 임계값을 결정하는 것은 어려운 일이다.

#### IV. IEEE 802.11ac/ad의 적응형 MCS 구현방안

##### 4.1 MCS 기술<sup>[6]</sup>

IEEE 802.11ac에서 사용되는 변조기법은 BPSK(binary phase shift keying), QPSK(quadrature phase shift keying), 16-QAM(quadrature amplitude modulation), 64-QAM 및 256-QAM이 있다. 256-QAM은 IEEE 802.11n 표준에서는 지원되지 않는다. FEC(Forward Error Correction)부호화는 1/2, 2/3, 3/4, 및 5/6의 코드율이 사용된다. BCC(Binary Convolutional Coding)는 의무사항이며 LDPC

(Low-Density Parity- Check Coding)는 선택사항이다. IEEE 802.11ad는 SC(Single Carrier) 변조기법과 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 변조기법을 정의한다. OFDM 기술을 사용하면 통신거리가 더 확장되고 지연 확산값이 더 커지는 데 이것은 장애물에서 반사된 신호를 처리하는 데 유효성을 갖도록 한다. OFDM 기법은 SQPSK, QPSK, 16-QAM 및 64-QAM 변조기술을 사용하여 6.756 Gb/s의 최대 물리계층 데이터율을 얻을 수 있도록 한다. SC PHY는 전력 소모가 적고 핸드셋같은 small form factor 디바이스에 적용한다. SC는  $\pi/2$ -BPSK,  $\pi/2$ -QPSK 및  $\pi/2$ -16 QAM 변조기술을 사용하여 4.620 Gb/s의 최대 물리계층 데이터율을 얻을 수 있도록 한다. 이 표준에서 데이터는 1/2, 5/8, 3/4 및 13/16 부호율을 갖는 LDPC에 의해서 부호화된다. IEEE 802.11ad에서는 수기가비트의 물리계층 데이터율이 BPSK 및 QPSK와 같은 간단한 변조기법으로 2 GHz 정도의 스펙트럼을 사용함으로써 얻어진다. 반면에 IEEE 802.11ac는 채널 결합기술을 사용해도 160 MHz의 대역폭까지만 제공하기 때문에 256-QAM과 같은 복잡한 변조기법과 동시에 8개 까지의 데이터 스트림을 전송할 수 있는 기법을 이용한다. 표 3은 수 메가비트 및 수 기가비트의 물리계층 데이터율을 갖는 IEEE 802.11n, IEEE 802.11ac 및 IEEE 802.11ad의 MCS기법을 나타낸다.

IEEE 802.11n 및 IEEE 802.11ac는 두 개의 심볼간에 800 ns의 긴 보호간격을 지원하고 선택적으로 400 ns의 짧은 보호대역도 지원한다. IEEE 802.11ad는 48.4 ns의 보호간격을 지원한다. 표 3의 IEEE 802.11n 및 IEEE 802.11ac는 긴 보호대역을 사용한 것으로 가정하였다. 짧은 보호대역을 사용하면 데이터율이 증가되는데 IEEE 802.11n의 경우에 최대 데이터율이 540 Mb/s에서 600 Mb/s까지 증가되고 IEEE 802.11ac의 최대 데이터율은 6.240 Gb/s에서 6.933 Gb/s까지 증가된다. IEEE 802.11n에서는 변조기법, 코드율, 채널 대역폭, 보호간격 및 공간 스트림 수의 조합 기술을 통해서 6.5 - 600 Mb/s의 물리계층의 데이터율이 얻어진다. IEEE 802.11ac는 6.5 Mb/s에서 6.933 Gb/s까지의 물리계층의 데이터율을 지원한다. 256-QAM 변조기법을 사용하는 IEEE 802.11ac의 물리계층의 데이터율은 720 Mb/s이 되는데 64-QAM 변조기법, 800 ns 보호간격, 40 MHz 채널 대역폭 및 4개의 공간스트림을 이용하는 IEEE802.11n의 물리계층 데이터율은 540 Mb/s가 된다.

IEEE 802.11ac는 256-QAM 변조기법을 사용할 수 있으므로 IEEE 802.11n에 비하여 33%의 데이터율 증

표 3. IEEE 802.11n, 802.11ac 및 802.11ad의 MCS<sup>[6]</sup>  
 Table 3. MCS for IEEE 802.11n, 802.11ac and 802.11ad

Modulation	Code rate	PHY data rate (Mbit/sec)					Spatial streams	Standard
		20MHz channel	40MHz channel	80MHz channel	160MHz channel	2.16GHz channel		
BPSK	1/2	6.5	13.5	-	-	-	1	802.11n
QPSK	3/4	19.5	40.5	-	-	-	1	802.11n
16-QAM	3/4	26	81	-	-	-	1	802.11n
64-QAM	5/6	65	135	-	-	-	1	802.11n
64-QAM	5/6	260	540	-	-	-	4	802.11n
BPSK	1/2	6.5	13.5	29.3	58.5	-	1	802.11ac
QPSK	3/4	19.5	40.5	87.8	175.5	-	1	802.11ac
16-QAM	3/4	39	81	175.5	351	-	1	802.11ac
64-QAM	5/6	65	135	292.5	585	-	1	802.11ac
256-QAM*	5/6	78	180	390	780	-	1	802.11ac
256-QAM*	5/6	312	720	1560	3120	-	4	802.11ac
256-QAM*	5/6	624	1440	3120	6240	-	8	802.11ac
p/2-BPSK	1/2	-	-	-	-	385	1	802.11ad
p/2-BPSK	3/4	-	-	-	-	1155	1	802.11ad
p/2-QPSK	3/4	-	-	-	-	2310	1	802.11ad
p/2 16QAM	3/4	-	-	-	-	4620	1	802.11ad
64-QAM	13/16	-	-	-	-	6756.75	1	802.11ad

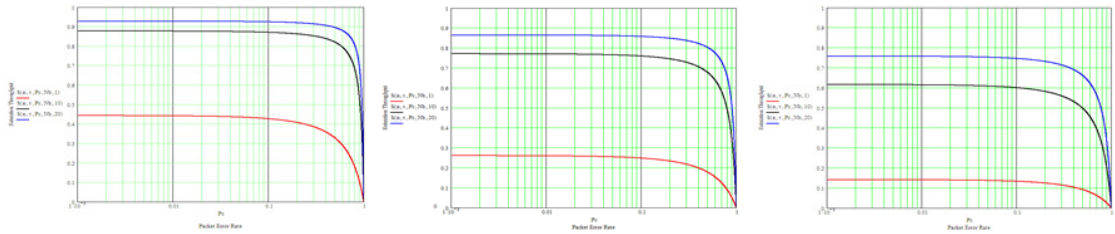
\* 20 MHz 채널 대역폭인 경우에 코드율은 3/4

가 효과가 있다. IEEE 802.11ad는 변조기법과 코드율을 조합하는 기법을 통해서 385 Mb/s에서 6.7 Gb/s까지의 데이터율이 얻어진다. BPSK 변조방식을 사용하는 경우에 2.16 GHz 채널 대역폭을 사용하는 IEEE 802.11ad는 385 Mb/s의 데이터율이 얻어지고 20 MHz 채널 대역폭을 사용하는 IEEE 802.11n은 6.5 Mb/s의 데이터율이 얻어진다. 이는 IEEE 802.11ac의 경우에 더 넓은 대역폭이 필요하지만 58배의 데이터율 증가 효과가 있음을 나타낸다.

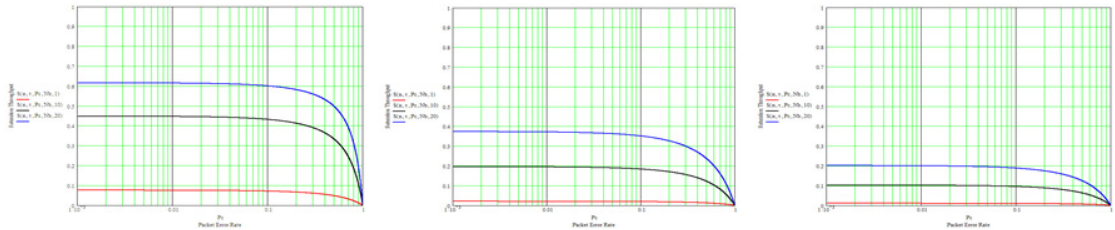
#### 4.2 IEEE 802.11ac의 MCS 기반 DCF 처리율 분석

IEEE 802.11ac 표준에 따르면 PHY 데이터 서브캐리어는 BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM 및 256-QAM 방식을 사용하여 변조된다. 256-QAM은 IEEE 802.11n에서는 지원되지 않는다. FEC 코딩 사용시 코드율은 1/2, 2/3, 3/4 및 5/6이 사용되고 BCC는 의무사항이며 LDPC는 옵션사항이다. 그림 2는 1, 4 및 8개의 공간 스트림을 사용하는 IEEE 802.11ac 무선 LAN의 DCF 처리율을 나타낸다<sup>[10-13]</sup>. S(n, τ, Pc, Nb, Nf)는 에러를 갖는 채널하에서의 DCF 처리율 성능을 나타낸다. N<sub>ES</sub>는 OFDM 심볼당 각각의 BCC 부호기에 대한 punctured 블록의 개수를 나타낸다. 그림 2a는 채널 대역폭이 20 MHz이고, 변조기법으로 256-QAM이 사용되고, 코드율은 3/4, 보호간격은 800

ns, BCC 부호기의 수가 1, 물리계층의 데이터율이 78 Mbps일 때 DCF 처리율 성능을 나타낸다. 그림 2b는 채널 대역폭이 40 MHz, 변조기법으로 256-QAM, 코드율은 5/6, 보호간격은 800 ns, BCC 부호기의 수는 1, 물리계층의 데이터율이 180 Mbps일 때 DCF 처리율 성능을 나타낸다. 그림 2c는 채널 대역폭이 80 MHz, 변조기법은 256-QAM, 코드율은 5/6, 보호간격은 800 ns, BCC 부호기의 수는 1, 물리계층의 데이터율이 390 Mbps일 때의 DCF 처리율 성능을 나타낸다. 그림 2d는 채널 대역폭이 160 MHz, 변조기법은 256-QAM, 코드율은 5/6, 보호간격은 800 ns, BCC 부호기의 수는 2, 물리계층의 데이터율이 780 Mbps일 때 DCF 처리율 성능을 나타낸다. 그림 2e와 그림 2f는 N<sub>ES</sub>와 데이터율만 제외하고 그림 2d와 같은 조건일 때이다. 패킷 에러율이 10<sup>-2</sup>이고 각각의 A-MPDU에서 합쳐진 MPDU의 수가 20일 때 IEEE 802.11ac의 MAC 효율은 그림 2a에서 보여진 바와 같이 물리계층 데이터율의 92.8%에 해당된다. 그림 2a와 동일한 조건에서 그림 2b는 MAC 효율이 물리계층 데이터율의 86.4%에 해당되고, 그림 2c는 MAC 효율이 물리계층 데이터율의 75.7%에 해당된다. 그림 2d는 물리계층 데이터율의 61.5%, 그림 2e는 물리계층 데이터율의 37.4%, 그림 2f는 물리계층 데이터율의 20.1%에 해당된다는 것을 알 수 있다.



(a) 채널 대역폭이 20MHz, 코드율이 3/4, 변조기법이 256-QAM,  $N_{ES}$ 는 1, 물리계층의 데이터율이 78Mbps인 경우  
 (b) 채널 대역폭이 40MHz, 코드율이 5/6, 변조기법이 256-QAM,  $N_{ES}$ 는 1, 물리계층의 데이터율이 180Mbps인 경우  
 (c) 채널 대역폭이 80MHz, 코드율이 5/6, 변조기법이 256-QAM,  $N_{ES}$ 는 1, 물리계층의 데이터율이 390Mbps인 경우



(d) 채널 대역폭이 160MHz, 코드율이 5/6, 변조기법이 256-QAM,  $N_{ES}$ 는 2, 물리계층의 데이터율이 780Mbps인 경우  
 (e) 채널 대역폭이 160MHz, 코드율이 5/6, 변조기법은 256-QAM,  $N_{ES}$ 는 6, 물리계층의 데이터율이 3,120Mbps인 경우  
 (f) 채널 대역폭이 160MHz, 코드율이 5/6, 변조기법은 256-QAM,  $N_{ES}$ 는 12, 물리계층의 데이터율이 6,240Mbps인 경우

그림 2. IEEE 802.11ac의 DCF 처리율 성능  
 Fig. 2. DCF Throughput Performance for IEEE 802.11ac

그림 2에서 알 수 있듯이 IEEE 802.11ac의 MAC 효율은 패킷 에러율이  $10^{-2}$ , 각각의 A-MPDU에서 통합된 MPDU의 수가 20일 때 최대 물리계층 데이터율의 92.8%에 달한다는 것을 확인할 수 있다. 또한 물리계층의 데이터율이 높으면 높을수록 MAC 효율은 감소된다는 것을 알 수 있다.

### 4.3 IEEE 802.11ac의 MCS 적응방안

위의 분석결과를 통해서 알 수 있듯이 물리계층의 데이터율이 높으면 높을수록 MAC 효율이 감소되는 것을 알 수 있는데, 이러한 현상을 보완하기 위해 시간적으로 변하는 채널의 상태에 따라 변조 레벨 및 코딩율을 동적으로 조절할 수 있는 적응형 MCS의 적용을 고려할 수 있다.

우선적으로 적용할 수 있는 SNR 기반의 적응형 변조방식은 SNR이 BER 및 채널 용량에 관련된다<sup>[7,9]</sup>. 결과적으로 SNR은 링크의 품질을 나타내는 적합한 파라미터일 수 있다. 현재의 SNR과 각 MCS 레벨에 대해서 SNR-처리율 관계를 안다면 전송율 선정 문제는 현재의 SNR에 대해서 가장 높은 처리율값을 나타내는 전송율로 스위칭함으로써 쉽게 해결될 수 있다. 이러한

처리절차는 SNR-처리율 look-up 테이블을 사용함으로써 효율적으로 구현될 수 있다. 만족스런 QoS를 얻으려면 SNR-PER 관계가 SNR-처리율 관계대신에 사용될 수 있다. IEEE 802.11n 표준에서는 8개의 SISO MCS 레벨이 있다. 빠른 링크 적응속도에도 불구하고 SNR 기반 기법은 링크의 SNR 예측값을 얻는 것이 어렵기 때문에 실제로 적용되지 않고 있다. lookup 테이블은 채널의 통계 데이터에 의존하기 때문에 lookup 테이블에서 주어진 SNR에 일치하는 데이터 전송율은 다른 채널 조건에서 최적값이 아닐 수도 있다. 처리율과 PER간에는 trade-off 관계가 있다. 이러한 알고리즘 조차도 PER 요구조건과 최대 처리율을 만족시키는 데이터율과 SNR의 관계를 알아내는 것을 어려운 일이다.

한편 SNR 오프셋 기반의 적응형 변조방식은 ARF와 SNR 기반의 adaptive modulation 알고리즘의 단점을 극복할 수 있는 방식으로서 알고리즘은 다음과 같다.

- 여러 다른 무선채널에 대해서 SNR-처리율 lookup 테이블을 off-line으로 구성

- offset 값은 0으로 초기화
- 수신기에서 패킷 에러가 발생하면 offset값은 a만큼 증가
- 현재의 예측 SNR값과 offset값을 더한 값이 lookup 테이블의 최대 SNR값을 초과하면 offset 값은 증가되지 않음
- 수신된 패킷에 에러가 없으면 offset값은 b만큼 감소
- 현재의 예측 SNR값과 offset값을 더한 값이 lookup 테이블의 최소 SNR값 보다 적다면 offset 값은 감소되지 않음
- 예측된 SNR값에 업데이트된 offset값을 더함
- 테이블에서 수정된 SNR값에 대응되는 MCS 레벨을 선택
- 수신기는 선택된 MCS 레벨을 갖고 다음 패킷을 요청 초기 MCS 레벨 설정이 천이시간을 단축하는데 중요한 기존의 ARF 알고리즘과 같지 않게 SNR 기반의 adaptive modulation 알고리즘은 짧은 천이시간과 신속한 링크 적응속도의 구현이 가능하다. 이는 기본적으로 기존의 SNR 기반의 기법에서와 같이 적합한 MCS 레벨을 선정하는데 SNR-처리율 lookup 테이블을 사용하기 때문이다. 결론적으로 이 기법은 짧은 에러 버스트를 갖는 급변하는 페이딩 채널에서 ARF 알고리즘보다 더 견고하다. 최적의 SNR-처리율 lookup 테이블은 채널 조건에 달려 있다. 그러므로 기존의 SNR 기반의 알고리즘에서 최적 테이블의 선정은 성능에 가장 영향을 미치는 요인중의 하나이다. 그러나 이 기법에서는 여러 채널조건에 대해서 평균화된 고정 SNR-처리율 lookup 테이블을 사용한다. 즉, 예측된 SNR값과 lookup 테이블의 정확도에 의존하는 기존의 알고리즘과는 다르게 이 기법은 SNR offset값을 사용함으로써 MCS레벨과 SNR사이의 부정합 및 SNR 예측 에러를 극복할 수 있다. 더욱이 offset값은 PER 요구사항을 만족시키는데 중요한 역할을 한다.

#### 4.4 IEEE 802.11ad의 MCS 적응방안

IEEE 802.11ad는 SC변조와 OFDM변조를 정의한다. OFDM은 더 먼거리 통신이 가능하고 더 큰 delay spread를 갖는다. 이것은 장애물 및 반사신호를 처리하는 데 유효성을 제공한다. OFDM 기법은 SQPSK, QPSK, 16-QAM 및 64-QAM 변조기법을 이용하며 물리계층의 최대 데이터율은 6.756 Gb/s이다. SC PHY기법은 전력소비량이 낮고 핸드셋과 같은 small form factor device 에 적용한다. SC는  $\pi/2$ -BPSK,  $\pi/2$ -QPSK,  $\pi/2$ -16-QAM 변조기법을 이용하며 물리계층의 최대 데이터율은 4.620 Gb/s이다. 데이터는

LDPC에 의해서 코딩되며 코드율은 1/2, 5/8, 3/4 및 13/16이 이용된다.

IEEE 802.11ad에서 MCS 기법을 선택하는 것은 트래픽 모델 및 애플리케이션 시나리오의 요건에 의존한다고 볼 수 있다. SC PHY 및 OFDM PHY 모드 상호 연동성을 보장하기 위하여 다른 60GHz 시스템과의 공존과 공통 MCS가 정의될 것이다. 지원 데이터율, 전송범위 및 복잡도에 따라 SC PHY에서의 MCS는 3가지 클래스로 분류된다<sup>[14]</sup>.

- 저전력, 저비용 이동 디바이스의 1 Gbps까지의 데이터율
- 3 Gbps까지의 데이터율을 지원하는 디바이스
- 5 Gbps 이상의 데이터율을 갖는 고성능 애플리케이션 지원 데이터율  $D$ 는

$$D = R_s \times M_{tvl} \times R_c / SF \text{와 같이 계산된다.}$$

$R_s$ 는 1760 Mbps의 심볼율을 나타낸다.  $M_{tvl}$ 는 변조레벨을 나타내고  $R_c$ 는 FEC 코딩율,  $SF$ 는 spreading factor을 나타낸다. MCS의 선택은 에러율, 전력소비 및 하드웨어 단순성에 관련시키는 애플리케이션 요건에 기반을 둔다. 칩 설계관점에서 간단하고 명쾌한 MCS 기법이 필요하다. 지원 데이터율과 BER 성능에 따라 여러 MCS 기법이 3가지 부류의 응용서비스 요건을 만족시키기 위하여 여러 MCS 기법이 선정된다. MCS 0, 1, 2, 5는 spreading factor 64, 4, 2, 2를 갖는 변조기법이다. code spreading을 사용하는 목적은 헤더 및 MAC 프레임 body 전송시 robustness를 증가시키는 것이다.

IEEE 802.11ad 시스템은 OFDM PHY뿐만 아니라 SC PHY 기술을 사용하기 때문에 서로 다른 PHY가 통신하기 위해서는 common mode signalling이 필요하다. common mode signalling은 SC에서 OFDM 또는 다른 SC간에 확장이 용이한 융통성을 갖춘 시스템을 구현하려는 핵심 표준기술이다. MCS0 및 MCS3는 802.11ad의 모든 PHY에 의해서 지원되어야 하는 공통적인 MCS기법으로 제안된다. BPSK는 하드웨어를 손상시킬 수 있는 비 이상 채널효과에 대처할 수 있는 견고성 때문에 공통 시그널링 변조기법으로 선정된다. RS 코드는 높은 코딩이득과 하드웨어 복잡성간에 최상의 tradeoff 특성을 나타내므로 공통모드 시그널링을 위한 FEC 코딩기법으로 선택된다. Common mode 시그널링을 위해서 MCS를 선택하는 것은 다른 60GHz mmWave 시스템과의 공존을 가능하게 한다.

## V. 결 론

본 연구에서는 DCF 처리율 향상을 위해 무선 LAN에 적용할 수 있는 일반적인 전송율 제어기술에 대하여 살펴보고 초고속 무선 LAN인 IEEE 802.11ac 및 802.11ad 표준과 MCS 기술에 대하여도 조사분석하였다. 분석내용을 기반으로 IEEE 802.11ac 무선 LAN의 DCF 처리율 성능을 여러 조건하에서 구하였고 IEEE 802.11ac 와 802.11ad에의 MCS의 적용방안도 제시하였다. IEEE 802.11ac 및 802.11ad는 기존의 IEEE 802.11b/g/a/n 무선 LAN과는 달리 여러 종류의 MCS를 제공하므로 전송율 제어 알고리즘이 적용된다면 시간적으로 변하는 채널조건에 따라 전송율을 조정하여 처리율을 향상시킬 수 있을 것이다. 그러나 표준에서는 전송율을 제어할 수 있는 알고리즘을 제시되고 있지 않아서 많은 알고리즘들이 개발되고 있는 실정이다. 향후에는 각각의 A-MPDU에 통합된 MPDU의 수에 따른 MAC 처리율 성능을 평가하여 여러 각도에서 MAC 처리율 성능을 연구할 것이고, 특히 시간적으로 변하는 채널의 상태에 따라 이 MCS 기법들을 적응적으로 적용하기 위한 알고리즘 개발 및 시뮬레이션을 통해서 최상의 MAC 처리율을 얻기 위한 연구도 병행할 예정이다.

## References

[1] IEEE 802.11n, *Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specification: Enhancements for Higher Throughput*, 2009.

[2] IEEE 802.11ac, *Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specification: Enhancements for Very High Throughput for Operation in Bands below 6 Ghz*, 2013.

[3] IEEE 802.11ad, *Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specification: Enhancements for Very High Throughput in the 60 Ghz Band*, 2012.

[4] H. C. Lee, "FER performance in the IEEE 802.11a/g/n wireless LAN over fading channel," *Commun. Netw.*, vol. 5, no. 3B1, pp. 10-15, Aug. 2013.

[5] G. R. Hiertz, D. Denteneer, L. Stibor, Y. Zang,

X. P. Costa, and B. Walke, "The IEEE 802.11 universe," *IEEE Commun. Mag.*, pp. 62-70, Jan. 2010.

[6] L. Verma, M. Fakharzadeh, and S. H. Choi, "WiFi on steroids : 802.11ac and 802.11ad," *IEEE Wirel. Commun.*, pp. 30-35, Dec. 2013.

[7] C. H. Kim, K. W. Jeong, K. J. Ko, and J. W. Lee, "SNR-based adaptive modulation for wireless LAN systems," *IEEE ISCAS 2012*, pp. 758-761, Seoul, 2012.

[8] A. B. Makhoulouf and M. Hamdi, "Practical rate adaptation for very high throughput WLANs," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 12, no. 2, pp. 908-916, Feb. 2013.

[9] H. C. Lee, "A study on the transmission rate control and MCS in The WLAN," *2014 KICS Summer Conf.*, pp. 936-937, Jeju, Korea, Jun. 2014.

[10] H. C. Lee, "Analysis of frame error rate in The IEEE 802.11a/g/n Wireless LAN IEEE 802.11a/g/n," *2013 KICS Summer Conf.*, pp. 573-574, Jeju, Korea, Jun. 2013.

[11] H. C. Lee, "A relation of subframe size, retry limit and throughput in The IEEE 802.11n Wireless LAN," *2012 KICS Summer Conf.*, 11E-19, Jeju, Korea, Jun. 2012.

[12] H. C. Lee, "A MAC throughput in The IEEE 802.11ac Wireless LAN over error-prone channel," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 631-632, pp. 801-805, 2014.

[13] H. C. Lee, "A performance of MAC layer over error-prone channel in The IEEE 802.11ac," *ACEC 2014*, ACEC-14-198, Oct. 2014.

[14] L. Lu, X. Zhang, and R. Funada, "Selection of modulation and coding schemes of single carrier PHY for 802.11ad multi-gigabit mm wave WLAN systems," *ISCC 2011*, pp. 348-352, 2011.



이 하 철 (Ha-cheol Lee)



1983년 3월 : 한국항공대학교 항공  
통신공학과 졸업

1990년 8월 : 한국항공대학교 항공  
통신정보공학과 석사

1999년 8월 : 한국항공대학교 항공  
통신정보공학과 박사

1993년 12월 정보통신기술사

1983년 3월~1985년 6월 : ETRI 연구원

1985년 7월~1995년 8월 : KT 선임연구원

1995년 9월~현재 : 유한대학교 정보통신과 교수

<관심분야> 무선 LAN, IP 네트워크, IoT, 클라우드  
컴퓨팅