

차세대 Wi-Fi 8에서 동적 대역폭 절전 기법

이 광 호*, 안 우 진*, 김 용 호^o

Dynamic Bandwidth Power Saving Scheme in the Next Generation Wi-Fi 8

Gwang-ho Lee*, Woojin Ahn*, Ronny Yongho Kim^o

요 약

무선랜 환경에서 모바일 무선 접속점(Access Point, AP)의 활용 증가 및 AP 소비 전력 증가에 따라 AP 저전력 통신 기술에 대한 요구가 증가하고 있다. 이러한 요구를 만족하기 위해 차세대 무선랜 표준화 단체인 IEEE 802.11bn Task Group (TGbn)은 AP가 송수신하지 않는 시간 동안 통신 대역폭을 축소하여 대기하다가, 데이터 전송 이전에 단말과의 프레임 교환으로 AP의 통신 대역폭을 확장한 후 데이터 통신을 수행하고 다시 절전 동작을 수행하는 동적 대역폭 절전 기법의 도입을 논의 중이다. 본 논문에서는 TGbn에서 논의하고 있는 동적 대역폭 확장 전송 기법의 하나를 컴퓨터 모의실험을 통해 분석하며, 대역폭 확장 없이 통신하는 기법과 비교한다. 컴퓨터 모의실험 결과 동적 대역폭 절전 기법이 대역폭 확장 없이 통신하는 기법 대비 유효 처리율이 OBSS (Overlapping Basic Service Set)가 존재하는 환경에서 최대 1.27배, 간섭 없는 다수 단말 경쟁 환경에서 최대 5.06배 향상된 성능을 보인다. 제안한 기법을 차세대 무선랜에 적용하면 AP 절전 성능을 달성하면서 고속 통신 및 저 지연 성능을 확보할 수 있다.

키워드 : 무선랜, IEEE 802.11bn, 무선 접속점 절전, 대역폭 확장

Key Words : Wireless local area networks(WLAN), IEEE 802.11bn, AP power saving, Bandwidth expansion

ABSTRACT

In wireless LAN environments, the increasing use of mobile wireless access points (APs) and the growing power consumption of APs have led to a rising demand for low-power communication technologies for APs. To meet this demand, the IEEE 802.11bn Task Group (TGbn), a next-generation wireless LAN standardization group, is considering the introduction of a dynamic bandwidth power saving scheme. This scheme involves reducing the communication bandwidth of the AP during periods when it is not transmitting or receiving, then expanding the bandwidth through frame exchanges with STA before data transmission, and subsequently reverting to power-saving mode. This paper analyzes one of the dynamic bandwidth power saving schemes discussed by TGbn through computer simulations and compares it with a scheme that operates without bandwidth expansion. The simulation results show that the dynamic bandwidth power saving scheme achieves up to 1.27 times higher effective throughput with Overlapping Basic Service Set (OBSS) interference and up to 5.06 times higher effective throughput in interference-free multi-device competition scenarios compared to the scheme without bandwidth expansion. Applying the proposed scheme to next-generation wireless LANs can provide both power-saving performance for APs and high-speed, low-latency communication.

※이 논문은 2024년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. RS-2023-00240949)

• First Author : Korea National University of Transportation, gwangho.lee@a.ut.ac.kr, 학생회원

◦ Corresponding Author : Korea National University of Transportation, ronny1004@gmail.com, 정회원

* Korea National University of Transportation, woojin.ahn@ut.ac.kr

논문번호 : 202407-158-B-RN, Received July 26, 2024; Revised September 15, 2024; Accepted October 1, 2024

I. 서 론

오늘날, 무선랜 환경에서 Virtual Reality (VR) 기기, 실시간 응용 (Real-time application) 프로그램의 활용이 증가함에 따라 무선랜의 저 지연 성능 확보에 대한 수요가 급증하였다. 또한, AP의 대기 전력 소모량에 대한 우려가 증가하고 있고^[1], 배터리로 구동되는 스마트폰이 필요에 의해 AP로 동작하는 모바일 AP의 활용도가 높아짐에 따라 AP 저전력 통신 기술의 요구사항이 높아졌다^[2]. 이러한 변화된 요구사항들을 만족시키기 위해 차세대 무선랜 기술, Wi-Fi 8의 표준화가 2023년 11월 시작되었다. Wi-Fi 8 표준은 IEEE 802.11 Task Group bn (TGbn)에서 개발이 진행되고 있다. TGbn의 주요 개발 목표는 통신 속도 향상, 지연 성능 향상, AP 포함 절전 성능 향상 등이다. TGbn의 개발 목표 중 AP의 절전을 위한 저전력 통신은 기존 IEEE 802.11 표준에는 없는 동작이다. 따라서 기존 무선랜 전력 저감 연구들도 단말(Station, STA) 중심의 절전 알고리즘을 고안하고 그 성능을 실험하였다^[3-6].

TGbn에서 논의 중인 AP의 절전 동작에 대해 알아보기에 앞서, STA의 절전 동작에 대해 살펴본다. STA의 절전 동작은 주기적으로 송수신기를 끄고 켜는 것으로 구현된다. 송수신기가 꺼진 상태를 Doze State로 정의하며 이와 반대로 송수신기가 켜져 있는 상태를 Awake State로 정의한다^[7]. Doze State와 Awake State의 전환을 얼마나 효율적으로 수행하는지에 따라 IEEE 802.11 표준에는 다양한 절전 동작이 정의되어 있다.

가장 먼저 TIM (Traffic Indication Map) 전송 방법에 대해 알아본다. TIM 전송 방법은 AP가 주기적으로 전송하는 Beacon 프레임 내에 각 STA로 향하는 DL 트래픽의 유무를 알려주는 TIM (Traffic Indication Map)을 사용하는 방법으로, 절전 동작하는 STA는 Doze State로 동작하다가 Beacon 프레임이 전송될 것으로 예상되는 TBTT (Target Beacon Transmission Time)에만 Awake State로 전환하여 Beacon 프레임 내 TIM을 확인한다. STA는 TIM을 통하여 자신으로 향하는 DL 트래픽의 존재를 확인한 경우 AP에 PS-Poll (Power Save Poll) 프레임을 전송하여 AP의 버퍼에 저장된 DL 트래픽을 전달받을 수 있다. DL 트래픽 수신 후 STA는 다음 TBTT까지 다시 Doze State로 동작한다. 이 방법은 STA가 Beacon 프레임을 수신하기 위해 정해진 주기에 깨어날 필요가 있으며, DL 트래픽을 수신하기 위해 매번 PS-Poll 프레임을 전송해야 하는 단점이 있다.

또 다른 절전 방법으로 APSD (Automatic Power

Save Delivery)가 있다. APSD를 사용하면 STA가 DL 프레임을 수신하기 위해 매번 별도의 프레임 전송을 할 필요 없이 다수의 DL 프레임을 수신할 수 있도록 고안된 절전 방법이다. APSD는 AP와 STA의 스케줄링 여부에 따라 U-APSD (Unscheduled APSD)와 S-APSD (Scheduled APSD)로 나뉜다. APSD도 결국 DL 수신을 위해 STA가 주기적으로 깨어나 UL 트리거 프레임을 전송해야 하는 단점이 존재한다.

마지막으로 살펴볼 절전 동작은 TWT (Target Wake Time)이다. 앞서 TIM 전송 방법과 APSD는 모든 STA가 Beacon 프레임 수신을 위해 깨어나지만, AP는 한 번에 하나의 STA와 통신할 수 있으므로 AP와 다수의 STA는 한 STA의 DL 트래픽 수신 이 끝날 때까지 Awake State로 동작해야 하며 이는 추가적인 전력 소모로 이어진다. 하지만, TWT를 사용하면 STA는 AP와 사전에 협상한 시간에 깨어나 송수신 동작을 수행할 수 있다. 따라서 AP는 적절한 시간 관리를 통해 다수의 STA가 자신의 목표 기상 시간 (target wake time)에만 깨어나 AP와 통신할 수 있게 되며 추가적인 전력 소모를 방지할 수 있다.

상기 소개한 STA의 절전 동작은 STA의 송수신기가 Doze State에 있는 동안 높은 절전 성능을 보장한다는 장점이 있지만, STA의 송수신기가 Awake State로 복귀하기 전에는 데이터 송수신이 불가능하므로 높은 지연시간이 발생하는 단점이 존재한다. 특히, AP는 다수 단말에 대한 접속점 역할을 하므로 현재 표준에 정의된 STA의 절전 동작을 AP에 그대로 적용할 경우 네트워크 전반의 지연을 가중시킬 우려가 있다. 이는 TGbn의 목표인 통신 속도 향상, 지연 성능 향상 목표에 상충한다.

TGbn에서는 AP가 Awake State처럼 데이터 송수신을 할 수 있으면서 절전 성능을 만족할 수 있는 절전 방법이 논의되었다. AP의 절전 방법으로, AP의 동작 능력을 제한하여 절전 동작을 수행하는 방법이 TGbn에서 제안되었다^[8]. AP의 동작 능력을 제한하는 절전 방법 중 송수신기가 사용 가능한 전체 통신 대역폭(또는 채널)보다 좁은 대역폭만을 사용하여 대기하는 ‘협대역 고정 절전 방법’이 있을 수 있다. 무선랜 단말은 수신 대기 동작을 수행하는 대역폭에 비례하여 대기 전력을 소모하므로, 협대역 고정 절전 방법을 사용할 경우 대기 전력 감소의 효과를 얻을 수 있다^{[9], [10]}. 협대역 고정 절전 방법을 사용한 대기 전력 감소 효과는 통신에 사용하는 안테나 개수에 비례한다. 예를 들어 안테나가 3개인 경우 대기하는 대역폭이 160 MHz인 경우 20 MHz인 경우 대비 대략 50% 더 많은 대기 전력을 소비한다

[10]. Wi-Fi 7 (802.11be)은 MIMO(Multiple Input Multiple Output) 기술을 발전시켜 최대 16개의 공간 스트림 (Spatial Stream)을 지원하며, Wi-Fi 8 (802.11bn)은 통신 대역폭을 최대 320 MHz까지 지원하는 것을 목표로 하고 있다. 따라서, Wi-Fi 8을 적용한 기기들의 대기 전력 소모량은 크게 증가할 수 있으며, 협대역 고정 절전 방법을 통해 대기 전력을 줄이는 것은 AP의 절전 성능 확보를 위해 필수적임을 알 수 있다. 하지만, AP의 대기 전력 감소를 위해 협대역 고정 절전 방법만 사용하는 것은, 데이터 송수신 과정에서 송수신 시간 증가를 야기하여 평균 전력 소비량을 증가시킬 수 있다.

그림 1은 대역폭 크기에 따른 데이터 송수신 시간의 차이를 보여준다. 사용 가능한 최대 대역폭으로 동작하는 단말(AP 또는 STA)은 데이터 송수신에 소요되는 시간이 짧다. 하지만 좁은 대역폭으로 동작하는 단말은 제한된 대역폭 자원만을 사용하기 때문에 데이터 송수신에 소요되는 시간이 길다. 즉, AP가 협대역 고정 절전 방법을 사용하고 있는 경우, 별도의 대역폭 확장 없이 곧바로 송수신 동작을 수행한다면, 좁은 대역폭을 통한 송수신이 강제되기 때문에 전체 데이터 송수신 시간이 증가할 수 있다.

무선랜 단말은 송수신 동작 시 전력 소모량이 대기 전력 소모량 대비 큰 폭으로 증가하며, 송수신 대역폭 증가 대비 송수신 동작 시 전력 증가는 크지 않은 양상을 보인다^[10]. 따라서, 송수신하지 않는 동안에는 좁은 대역폭만을 사용하여 대기 전력을 최소화하다가, 데이터 송수신 시작 시에 사용 가능한 최대 대역폭으로 확장하여 송수신 동작 소요 시간을 줄이면 시간 대비 평균 전력 소모 측면에서 가장 큰 효율을 얻을 수 있으며, 본 논문에서는 이러한 동작을 ‘동적 대역폭 절전 기법’이라 칭한다.

본 논문에서는 AP에 연결된 STA가 협대역 고정 절

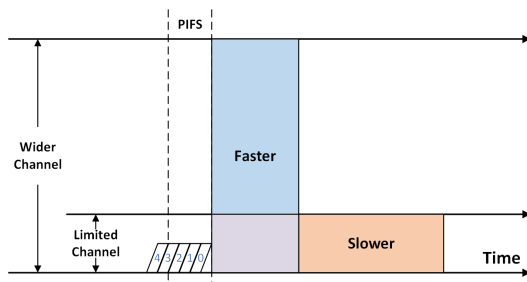


그림 1. 대역폭 크기에 따른 데이터 송수신 시간 차이
Fig. 1. Difference in data transmission and reception time depending on bandwidth size

전 방법으로 절전 중인 AP의 제한된 송수신 대역폭을 동적으로 확장하여 데이터를 신속하게 전송하는 방법인 동적 대역폭 절전 기법으로 가능한 방법의 하나를 제안한다. 본 논문에서 제안한 동적 대역폭 절전 기법의 우수한 성능을 다각적인 컴퓨터 모의실험을 통해 협대역 고정 절전 방법만을 사용한 절전 동작과 비교 분석한다. 컴퓨터 모의실험 결과 제안한 기법이 협대역 고정 절전 방법만을 사용한 절전 동작 대비 평균 처리율이 OBSS (Overlapping Basic Service Set)가 존재하는 환경에서 최대 1.27배, 간섭 없는 다수 단말 경쟁 환경에서 최대 5.06배 향상된 성능을 보인다. 본 논문에서 제안하는 동적 대역폭 절전 기법은 표준에 기반한 기법으로 Wi-Fi 8의 AP 절전 방법으로 사용된다면 절전 성능을 달성하면서 고속 통신 및 저 지연 성능을 확보할 수 있을 것으로 기대한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 협대역 고정 절전 방법과 본 논문에서 제안하는 동적 대역폭 절전 기법을 기술한다. 3장에서는 2장에서 기술한 두 기법의 성능을 컴퓨터 모의실험을 통해 분석하고 비교한다. 마지막으로 4장에서는 본 논문에서 제안하는 동적 대역폭 확장 전송 기법을 정리하고 추가 연구 방향을 제안한다.

II. 제안하는 동적 대역폭 절전 기법

2.1 협대역 고정 절전 방법

그림 2는 AP가 협대역 고정 절전 방법을 수행하는 상황에서 STA가 전송하는 상향 데이터를 수신하는 방법을 보여준다. AP와 그에 연결된 STA들이 있는 무선랜 네트워크에서 AP는 협대역 고정 절전 방법을 위해 송수신 대역폭을 최소 대역폭인 Primary 20 MHz 채널^[7]만 사용하도록 제한하는 것을 가정하며 STA들은 AP가 협대역 고정 절전 방법으로 절전 동작 중인 것을 인지하고 있다. 따라서, STA는 상향 링크 (Uplink, UL)

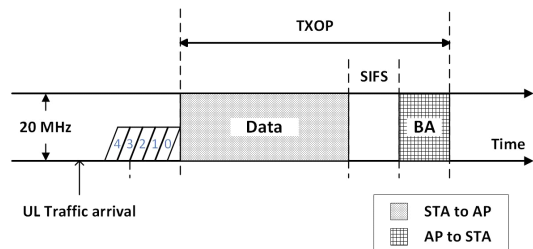


그림 2. 협대역 고정 절전 방법을 사용한 데이터 전송 방법
Fig. 2. Data Transmission method using narrowband waiting power saving method

트래픽이 발생한 경우, AP의 동작 대역폭인 Primary 20 MHz 채널에 한하여 무선랜 채널 접근 동작인 Enhanced Distributed Channel Access (EDCA)^[7] 동작을 수행한다. EDCA 동작이란, 채널 접근 시 단말 간 충돌 확률을 줄이기 위한 동작이다. 구체적으로, EDCA 동작을 통해 단말은 전송하려는 프레임 종류에 따라 정해진 대기 시간(예를 들어, DIFS(Data Interframe Space)) 동안 채널 점유 상태를 확인하는 Clear Channel Assessment (CCA)를 수행한 후 채널이 유휴(Idle) 상태인 경우 무작위로 선택한 백오프 카운터(Backoff Counter) 만큼 추가로 CCA를 수행하는 Random Backoff 동작을 수행한다. 단말은 EDCA 동작을 통해 최종적으로 채널이 유휴 상태로 확인된 경우에 프레임을 전송한다. CCA는 반송파 감지(Carrier Sense, CS) 동작 및 에너지 감지(Energy Detect, ED) 동작을 포함한다^[7].

EDCA 동작으로 채널 접근에 성공한 STA는 AP에게 UL 데이터 프레임을 전송하여 전송 기회(Transmit Opportunity, TXOP)를 획득할 수 있다. STA의 UL 데이터 전송이 완료되면 AP는 UL 데이터 프레임 수신 완료 후 SIFS 시간 후에 STA에게 BA 프레임을 전송하여 프레임의 올바른 수신 여부를 확인한다. 그림 2와 같이 협대역 고정 절전 방법을 사용하여 전송하는 경우, STA의 UL 데이터 프레임의 전송 대역폭이 20MHz로 제한되기 때문에, 사용 가능한 최대 대역폭을 사용하여 UL 데이터 프레임을 전송하는 경우보다 전송 시간이 길어져 STA 또는 AP의 전력 소모가 증가할 수 있다.

2.2 동적 대역폭 절전 기법

그림 3은 동적 대역폭 절전 기법을 사용하여 데이터 전송을 수행하는 방법을 보여준다. 그림 3에서 UL 데이터 전송을 시도하는 STA는 EDCA 동작으로 채널 접근을 수행할 수 있다. STA는 Primary 20MHz 채널에 대해 CCA를 수행하며, Secondary 채널에서는 Primary 20 MHz 채널에서의 Random Backoff 동작 종료 시점에 맞추어 Priority Interframe Space (PIFS) 시간 동안 CCA를 수행한다. Secondary 채널 점유 여부를 확인하기 위해 수행한 CCA는 임계치 이상의 전력 감지 여부만 확인하면 되므로 ED만 수행한다. Secondary 채널에 대한 CCA는 Primary 20 MHz 채널에서의 Random Backoff 동작 종료 시점에 맞추어 수행되므로 STA는 Random Backoff 동작 종료 시점에 프레임 전송이 가능한 총 대역폭을 알 수 있게 된다.

본 논문에서 제안하는 동적 대역폭 절전 기법은 구체적으로 Multi User Request To Send (MU-RTS) 트리거 프레임을 사용하는 기법이다. MU-RTS 트리거 프레임은 단순히 MU-RTS 프레임으로 표현한다. 본래 표준에서는 MU-RTS 프레임은 AP가 여러 STA가 동시에 Clear-To-Send (CTS) 프레임을 전송하도록 요청하는 프레임이지만, 본 논문에서는 STA가 AP의 CTS 전송을 요청하기 위해 사용한다는 점이 다르다. 이는 트리거 프레임이 별도의 시간 동기화를 위해 Padding을 추가할 수 있기 때문이며, Padding을 사용하여 AP가 MU-RTS 프레임을 수신한 후 STA의 요청에 따라 AP의 동작 대역폭 전환 시간을 확보할 수 있다. AP의 동작 대역폭 전환 시간 등에 대한 정보는 AP에 연결된 STA

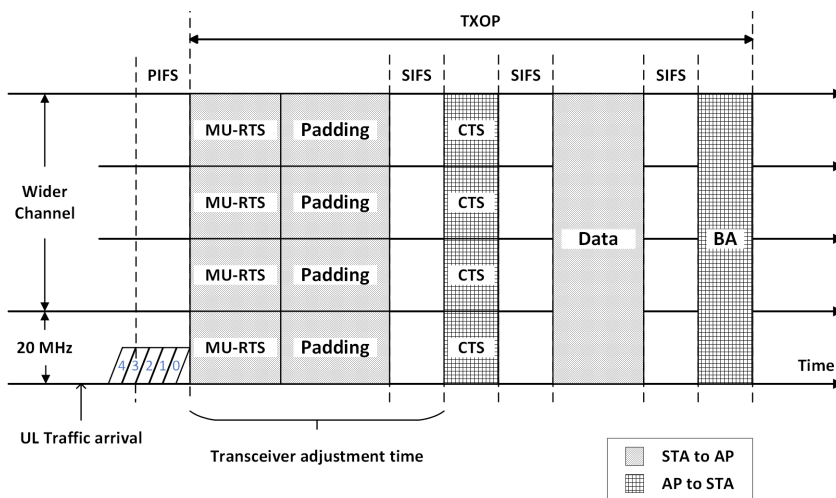


그림 3. 동적 대역폭 절전 기법을 사용한 데이터 전송

Fig. 3. Data transmission using dynamic bandwidth power saving scheme

들과 사전에 교환하였다고 가정하며, STA가 AP에 MU-RTS를 보내기 전에 AP의 성능(대역폭 전환 지연 시간 등) 및 채널 환경에 따라 Padding의 길이를 적절히 선택하여 전송한다.

STA는 AP의 동적 대역폭을 확장하여 UL 데이터를 전송하기 위해 MU-RTS 프레임을 확장하고자 하는 대역폭에 20 MHz 단위로 중복하여 전송한다. MU-RTS 프레임 중복 전송은 프레임이 전송되는 채널에서 TXOP을 획득하기 위함이다. STA는 대역폭 확장 요청 정보를 MU-RTS 프레임의 MAC 헤더 등에 포함할 수 있다. AP는 협대역 고정 절전 방법으로 절전 동작하고 있으므로 제한된 대역폭인 Primary 20 MHz 채널에서만 프레임을 수신할 수 있다. AP는 STA가 전송한 MU-RTS 프레임을 수신하고 대역폭 확장 요청 정보를 확인한 후 STA가 요청한 대역폭만큼 송수신기를 준비한다. AP는 자신이 바라보는 채널 상태에 따라 STA가 요청하는 대역폭을 모두 준비하지 못할 수 있다. 결국, AP는 MU-RTS 프레임의 수신 완료 시점으로부터 SIFS 만큼 시간 후에 STA가 요청한 대역폭 중 가용한 대역폭을 사용하여 STA에게 CTS 프레임으로 응답한다. AP가 STA에게 전송한 CTS 프레임은 확장된 대역폭을 포함하여 20 MHz 단위로 중복하여 전송된다. STA는 중복하여 전송된 CTS 프레임이 수신된 대역폭을 확인하여 AP가 대역폭 확장에 성공한 총 대역폭을 알 수 있다. STA는 CTS 프레임 수신 완료 후 SIFS 시간 후에 확장된 대역폭을 사용하여 UL 데이터 전송을 수행한다. STA의 UL 데이터 전송이 완료되면 AP는 UL 데이터 프레임 수신 완료 후 SIFS 시간 후에 STA에게 BA 프레임을 전송하여 프레임의 올바른 수신 여부를 확인한다. 이후 AP는 절전 동작의 필요에 따라 송수신기를 조정하여 다시 협대역 고정 절전 방법을 수행할 수 있다.

기존의 협대역 고정 절전 방법에서는 STA가 AP의 대역폭 확장을 유도하는 방법이 고려되지 않았다. 따라서, AP가 협대역 고정 절전 동작을 하는 경우, STA가 UL 트래픽을 전송하고자 하여도 제한된 대역폭만을 사용할 수밖에 없고 이는 유효 처리량을 낮추는 원인이 될 수 있다. 반면에, 동적 대역폭 절전 기법을 사용하면, AP는 협대역 고정 절전 방법으로 제한된 대역폭 이상의 대역폭을 사용하여 데이터를 송수신할 수 있으므로 신속한 데이터 교환을 통해 유효 처리량이 증가할 수 있고 단말의 절전 성능이 향상될 수 있다. MU-RTS 프레임을 사용한 대역폭 확장 절차에 따른 overhead가 존재할 수 있으나, 확장된 대역폭을 사용하여 전송되는 Data 프레임과 BA 프레임의 전송 시간이 크게 줄어들

기 때문에 협대역 고정 절전 방법 대비 여전히 빠른 송수신 시간을 가진다. 더 자세한 분석은 컴퓨터 모의실험 결과에서 후술한다.

III. 동적 대역폭 절전 기법 성능 분석

3.1 컴퓨터 모의실험 개요

이번 장에서는 협대역 고정 절전 방법과 본 논문에서 제안한 동적 대역폭 절전 기법의 성능을 컴퓨터 모의실험을 통해 다 각도로 비교 분석한다. 분석의 대상은 각 절전 방법 및 시나리오에 따른 유효 처리량 (Effective Throughput)이다. 본 논문에서 실시한 컴퓨터 모의실험에서 데이터를 주고받는 BSS는 하나만 존재하므로 유효 처리량을 수식으로 표현하면 (1)과 같다.

$$Effective\ Throughput = \frac{D_{success}}{T} \quad (1)$$

(1)에서 $D_{success}$ 는 한 BSS 내 전송에 성공한 데이터의 총량(bits)을 의미하며, T 는 컴퓨터 모의실험 시간(second)이다.

본 논문의 컴퓨터 모의실험에서 개별 시나리오들에 공통으로 적용한 파라미터는 표 1에 나와 있다.

표 1. 컴퓨터 모의실험 공통 파라미터
Table 1. Common parameters for computer simulation

Parameter	Value
Modulation Coding Scheme	MCS 13 (Bits Per Symbol = 12, Coding Rate = 5/6)
Number of Spatial Streams	1
Data Size	64 KB
Traffic Arrival Rate	10^{-5}
Symbol Time	12.8 μ s
Guard Interval	0.8 μ s
Access Category	VO
AIFSN	2
Slot Time	9 μ s
SIFS	16 μ s
PIFS	25 μ s
AIFS[VO]	34 μ s
AP's Transceiver Adjustment Time	200 μ s

3.2 컴퓨터 모의실험 세부 사항

본 논문에서 실시한 컴퓨터 모의실험의 시나리오는 네 가지이며, 각 시나리오에서 사용한 파라미터는 표 1의 내용을 공통으로 포함하여 표 2, 3, 4 그리고 표 5의 내용을 사용하였다. 협대역 고정 절전 방법의 컴퓨터 모의실험을 위한 파라미터는 동적 대역폭 절전 기법의 컴퓨터 모의실험을 위한 파라미터에서 동작 대역폭만 20 MHz로 제한하였다.

표 2. OBSS 간섭 발생 확률에 따른 컴퓨터 모의실험 파라미터
Table 2. Simulation parameters according to OBSS interference probabilities

Parameter	Value
Simulation Time	10 s
Number of STAs	10
Operation Bandwidth	20 MHz ~ 320 MHz
OBSS Interference Probability	0, 10^{-3} , 10^{-2} , 10^{-1} , 0.9

표 3. 경쟁하는 STA 수에 따른 컴퓨터 모의실험 파라미터
Table 3. Simulation parameters according to the number of competing STAs

Parameter	Value
Simulation Time	2 s
Number of STAs	2 ~ 152 (Interval = 10)
Operation Bandwidth	20 MHz, 320 MHz

표 4. 경쟁하는 STA 수 및 패킷당 데이터 크기에 따른 컴퓨터 모의실험 파라미터
Table 4. Simulation parameters according to the number of competing STAs and data sizes per packet

Parameter	Value
Simulation Time	2 s
Number of STAs	2 ~ 152 (Interval = 10)
Data Size	64, 128, 256 KB
Operation Bandwidth	20 MHz, 320 MHz

표 5. 경쟁하는 STA 수 및 트래픽 도착 확률에 따른 컴퓨터 모의실험 파라미터
Table 5. Simulation parameters according to the number of competing STAs and traffic arrival rates

Parameter	Value
Simulation Time	2 s
Number of STAs	2 ~ 152 (Interval = 10)
Traffic Arrival Rate	10^{-5} , 5×10^{-5} , 10^{-4}
Operation Bandwidth	20 MHz, 320 MHz

2장에서 설명한 AP의 동작 대역폭 확장 시간은 현재 동작 대역폭과 확장하려는 대역폭의 차이가 벌어짐에 따라 증가하는 경향을 보인다. 이를 분석한 논문^[10]을 참고하면, 20 MHz에서 40 MHz로 확장하는데 $40.5 \mu\text{s}$ 가 소요되었으며 20 MHz에서 80 MHz로 확장하는데 $73.6 \mu\text{s}$ 가 소요되었다. 이는 81.7 % 상승한 것으로 160 MHz 및 320 MHz로의 확장에 있어서 이러한 증가세가 이어진다고 할 때 약 $243 \mu\text{s}$ 의 지연시간이 예측된다. 단, 상기 연구^[10]는 IEEE 802.11ac (Wi-Fi 5) 표준을 적용한 칩셋(QCA9880)을 분석한 것이며, 칩셋 제조 기술 발전 및 제조사 별 제조 방식에 따라 동작 대역폭 전환에 필요한 시간은 다양할 수 있다. 본 컴퓨터 모의 실험에서는 실험의 편의성을 위해 확장 대역폭과 관계 없이 $200 \mu\text{s}$ 의 지연시간을 가진다고 설정하였다. 따라서, 시나리오에 따라 320 MHz보다 좁은 대역폭으로 확장하는 경우 실제 유효 처리량은 실험 결과보다 높을 수 있다. 동작 대역폭 전환 시간을 확보하기 위한 Padding은 MU-RTS 프레임 말단에 추가되므로 AP는 MU-RTS 디코딩 후 곧바로 동작 대역폭 확장을 위해 송수신기를 준비할 수 있다.

앞서 2.2절에서 살펴보았듯이, AP가 STA의 요청에 따라 동작 대역폭을 확장하기 위해서는 STA는 MU-RTS 프레임 전송 이전에 Primary 20MHz 채널에서 수행하는 EDCA 동작 종료 시점에 맞추어 Secondary 채널에서 PIFS 시간 동안 CCA를 수행해야 한다. CCA 도중 Secondary 채널에 임계치 이상의 전력이 감지된 경우 채널이 점유되었다고 판단할 수 있다. 이러한 경우는, Secondary 채널이 인접한 AP 또는 인접한 AP에 연결된 STA가 점유한 경우 발생할 수 있으며, 이를 Overlapping Basic Service Set (OBSS) 간섭이라 한다. OBSS 간섭이 발생한 경우 해당 채널을 제외하고 채널 접근을 시도한다. 따라서, STA는 OBSS 간섭이 발생한 채널이 Primary 20 MHz 채널이 아닌 경우 간섭이 발생한 채널을 제외한 후 Primary 20 MHz 채널을 포함하는 단일 대역폭 구성 중 하나를 선택하여 채널 접근을 수행, 채널을 점유할 수 있다.

그림 4는 동적 대역폭 절전 기법을 사용하는 STA가 Secondary 채널에서 임계치 이상의 전력을 감지한 경우의 예시를 보여준다. 그림 4에서 STA는 Secondary 채널에서 CCA를 수행한 결과 Ch. 2에서 임계치 이상의 전력을 감지하였다. STA는 Ch. 2에서 감지된 전력을 OBSS 간섭으로 판단하고 Ch. 2를 제외한 Ch. 0 (Primary 20 MHz 채널), Ch. 1을 사용하여 MU-RTS 프레임을 전송한다. Ch. 0과 Ch. 1에서 MU-RTS 프레임 수신한 AP는 동작 대역폭을 총 40 MHz로 확장하

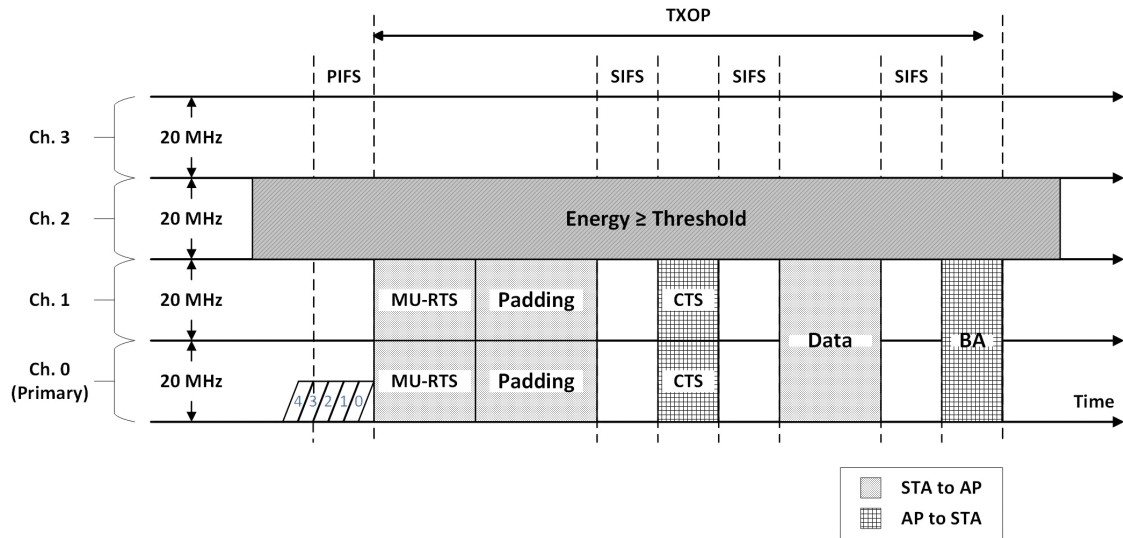


그림 4. Secondary 채널에서 OBSS 간섭 발생 시 동적 대역폭 절전 기법을 위한 채널 접근

Fig. 4. Channel access for dynamic bandwidth power saving scheme while OBSS interference occurs in secondary channel

고 CTS 프레임을 전송한다. 이후 2.2절에서 살펴본 절차를 통해 UL 데이터 프레임을 교환한다. 결국, AP는 OBSS 간섭이 없는 경우 20 MHz에서 320 MHz로 동작 대역폭을 전환하며, OBSS 간섭이 있는 경우 OBSS 간섭이 어느 채널에서 발생하였는지에 따라 20, 40, 80, 160, 320 MHz의 단일 대역폭 구성 중 사용 가능한 최대 대역폭으로 전환한다고 가정하였다.

본 컴퓨터 모의실험에서 채널 별 OBSS 간섭의 확률 분포는 주어진 OBSS 발생 확률에서 20 MHz 채널 단위로 균등하게 발생한다고 가정하였으며 채널당 OBSS 간섭 발생 확률은 수식 (2)와 같다.

$$P_{OBSS(CH)} = N_{20MHz} \times p_{OBSS(UnitTime)} \quad (2)$$

수식 (2)에서 $P_{OBSS(CH)}$ 는 채널당 OBSS 간섭 발생 확률, N_{20MHz} 는 전체 동작 대역폭 중 20 MHz 채널의 수, 그리고 $p_{OBSS(UnitTime)}$ 는 단위 시간 당 OBSS 간섭 확률을 의미한다. 예를 들어, $p_{OBSS(UnitTime)}$ 이 1 μs 당 0.1이고, AP와 STA가 사용 가능한 전체 대역폭이 320 MHz인 경우, $P_{OBSS(CH)}$ 는 0.00625/ μs 로 주어진다.

3.3 컴퓨터 모의실험 결과

컴퓨터 모의실험을 통해 확인한 결과, Data 프레임 전송 및 BA 프레임 수신에 소요되는 시간은 20 MHz를 사용한 경우 3,101 μs , 40 MHz를 사용한 경우 1,619

μs , 최대 대역폭인 320 MHz를 사용한 경우 327 μs 가 소요되었다. 협대역 고정 절전 방법은 20 MHz를 사용하여 Data 프레임 및 BA 프레임을 송수신하는 것이므로 항상 동일하게 3,101 μs 가 소요된다. 제안한 동적 대역폭 절전 기법은 단 하나의 채널만 확장한 경우(40 MHz로의 확장)에도 협대역 고정 절전 방법 대비 대략 1.92배, 320 MHz로 확장한 경우 대략 4.47배 더 빠른 송수신 시간을 가지며, 이는 제안한 동작을 사용하면 AP가 송수신 시간을 줄일 수 있고, 줄어든 송수신 시간 만큼 협대역 대기 상태에 더 오래 머무르며 절전 효과를 극대화할 수 있음을 보여준다. 만약, 협대역 고정 절전 방법에서 데이터 전송 이전에 전송 보호를 위한 RTS, CTS 프레임 교환 방법을 사용한다면 제안하는 기법을 사용하여 발생할 수 있는 오버헤드(MU-RTS, Padding 등)에 의한 영향은 더 적게 느껴질 수 있다. MU-RTS를 사용한 대역폭 확장 절차에 따른 overhead 외에도 기타 단말 내부의 신호 처리를 위한 전력 소모가 있을 수 있으나 이는 본 연구의 범위를 넘어서기 때문에 본 컴퓨터 모의실험에서는 고려하지 않았다.

제안하는 동적 대역폭 절전 기법의 절전 성능 분석을 위해 무선랜 단말의 State 및 대역폭, MCS 그리고 안테나 수에 따른 전력 소모량을 상세히 분석한 연구^[10]를 인용하여 제안하는 기법의 절전 성능을 분석하였다. 각 State에 따른 전력 소비량을 구한다. AP는 1개의 송수신 안테나와 MCS 13을 사용한다고 가정하였다. AP가 Listen State로 동작하는 경우 20 MHz로 동작하는 것을 가정하여 0.6 W를 소비한다고 가정하였다. AP가

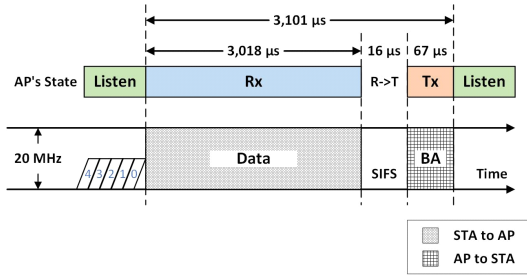


그림 5. 협대역 고정 절전 방법의 데이터 송수신 시간 및 AP의 동작 상태
Fig. 5. Data transmission time and AP's operating state of narrowband waiting power saving method.

Transmit State로 동작하는 경우 대역폭 및 MCS에 따른 변화는 미미하다^[10]. 따라서, Transmit State로 동작하는 경우는 인용한 논문^[10]을 참고하여 대역폭에 상관없이 2 W를 소비한다고 가정하였다. AP가 Receive State로 동작하는 경우 대역폭이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보이므로 인용한 논문^[10]을 참고하여 소비 전력을 2 W로 가정하였다. 이는 320 MHz로 동작하는 것을 가정하여 예측한 값이다.

다음으로, 각 State에 따른 동작 시간을 분석하여 협대역 고정 절전 방법과 제안하는 동적 대역폭 절전 기법의 소비 전력을 비교한다. 각 State 사이에 존재하는 SIFS 시간은 본래 Receive State에서 Transmit State로의 전환 시간을 보장하기 위해 존재하는 것으로, 16 μs의 짧은 시간을 가지는 점과 어느 한 State로 정하기 어렵다는 점을 고려하여 본 절전 성능 분석에서는 고려

하지 않았다.

그림 5는 협대역 고정 절전 방법을 사용한 송수신 과정 중 AP의 동작 State 및 동작 시간을 보여준다. 그림 5를 참고하면, 협대역 고정 절전 방법의 경우, AP는 Data 프레임 수신에 3,018 μs, BA 프레임 전송에 67 μs의 시간을 소모한다. 따라서, AP는 송수신 과정에서 617 μs를 소모한다. 그림 6은 동적 대역폭 절전 기법을 사용한 송수신 과정 중 AP의 동작 State 및 동작 시간을 보여준다.

그림 6을 참고하면, AP는 MU-RTS 및 Padding 수신에 267 μs, CTS 전송에 67 μs, Data 프레임 수신에 244 μs, BA 프레임 전송에 67 μs의 시간을 소모한다. 따라서, AP는 송수신 과정에서 총 129 μs를 소모한다. 따라서, AP는 동적 대역폭 절전 기법을 사용하여 최대 대역폭인 320 MHz의 대역폭으로 송수신할 때, 협대역 고정 절전 방법을 사용한 경우보다 약 21% 수준의 전력 소모량을 보여줄 수 있다. 결과적으로, 제안하는 기법을 사용하면 AP는 더 높은 유효 처리량을 가지면서도 절전 성능을 유지 혹은 향상할 수 있다.

다음으로, 협대역 고정 절전 방법과 동적 대역폭 절전 기법의 각 시나리오에 따른 유효 처리량을 컴퓨터 모의실험 결과를 통해 분석한다. 그림 7은 4가지 개별적인 시나리오에 따른 컴퓨터 모의실험 결과를 도시한 것이다. 그림 5에서 제안하는 기법(그림 7의 Proposed)에서 공통으로 보이는 유효 처리량의 개선은 동적 대역폭 확장 기법을 사용하여 얻어진 송수신 대역폭 증가에 기인한다. 프레임 전송 시간은 대역폭 크기에 반비례하

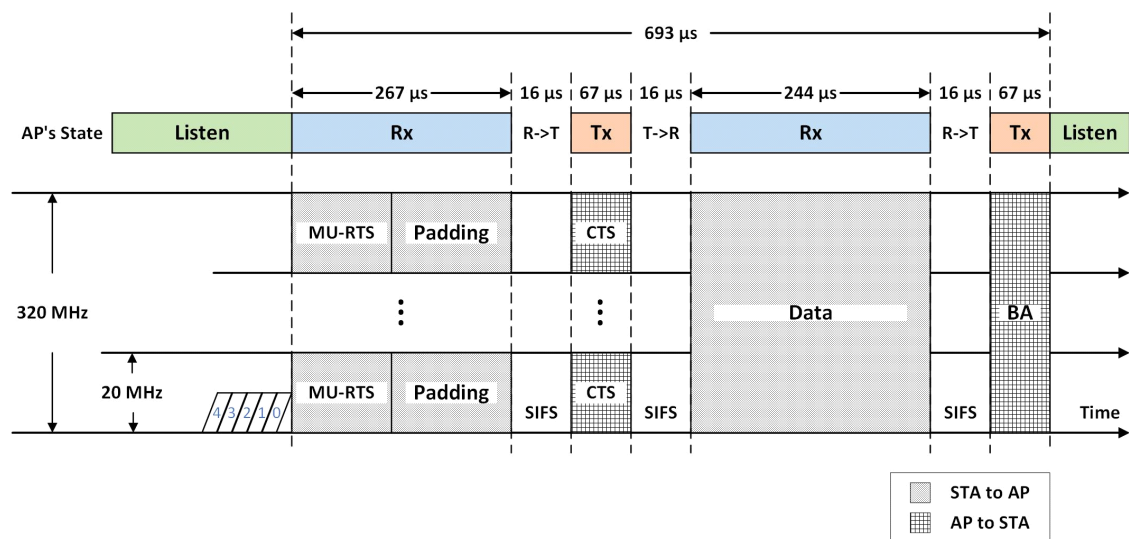


그림 6. 동적 대역폭 절전 기법의 데이터 송수신 시간 및 AP의 동작 상태
Fig. 6. Data transmission time and AP's operating state of dynamic bandwidth power saving scheme.

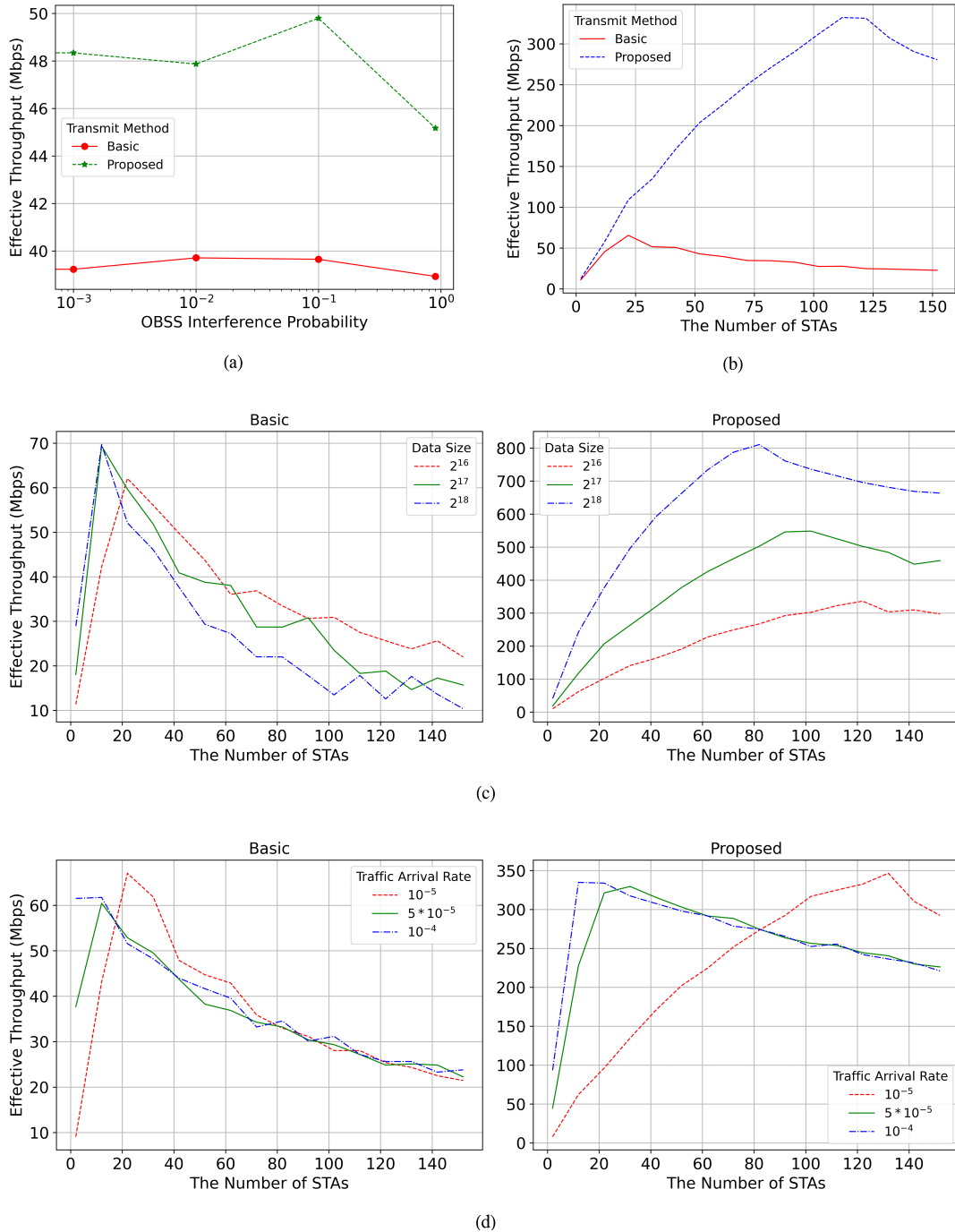


그림 7. 컴퓨터 모의실험 결과
Fig. 7. Simulation results

는 특성을 보인다. 따라서, 더 넓은 대역폭 자원을 사용할수록 같은 양의 데이터 전송에 필요한 시간이 감소하며 같은 시간에 더 많은 데이터를 전송할 수 있게 된다.

그림 7에서 보이는 유효 처리량의 포화는 EDCA를 사용한 STA의 채널 접근 경쟁에 기인한다. STA의 수가 증가함에 따라 채널 접근 경쟁이 심화하는데, EDCA

는 채널 접근을 위한 무작위 대기(Random Backoff) 시간을 선택하는 Contention Window (CW)의 값을 증가시켜 STA의 충돌 확률을 감소시킨다. 따라서, STA가 증가함에 따라 유효 처리량이 증가하게 된다. 하지만, CW는 무한정 증가하지 않으며 최대치인 CWmax 값이 존재한다. STA의 수가 계속해서 증가하여 CW가 최대치인 CWmax에 도달하면, STA들의 평균적인 Random Backoff 시간은 일정하지만, 충돌 확률은 계속해서 증가하기 때문에 유효 처리량이 낮아지게 된다. 따라서, 유효 처리량은 STA의 수가 증가함에 따라 함께 증가하다가 일정 STA 수에 다다르면 포화하고 다시 감소하게 된다. 이것이 그림 7에서 유효 처리량에 포화점이 존재하는 이유이다.

그림 7의 (a)는 OBSS 간섭 발생 확률에 따른 컴퓨터 모의실험을 수행하여 유효 처리량을 비교한 것이다. 본 컴퓨터 모의실험의 경우 협대역 고정 절전 방법(그림의 Basic)은 20 MHz 대역폭으로만 동작하기 때문에 OBSS 간섭에 의한 영향은 적다. 이와 다르게 동적 대역폭 절전 기법(그림의 Proposed)의 경우 OBSS 간섭이 발생하면 320 MHz보다 작은 대역폭으로만 확장하여 전송 절차를 수행하기 때문에 OBSS 간섭 확률이 증가할수록 유효 처리량이 낮아지는 경향을 보인다. 하지만 이 경우에도 협대역 고정 절전 방법과 비교하여 약 1.13~1.27배 더 높은 유효 처리량을 보여준다. 그림 5의 (a)에서 나타난 결과는 동적 대역폭 절전 기법이 전송 과정 중에 AP의 동작 대역폭을 확장하여 많아진 대역폭 자원을 가지고 전송을 수행함으로써 유효 처리량이 높아졌다고 해석할 수 있다.

그림 7의 (b)는 경쟁하는 STA의 수에 따른 컴퓨터 모의실험을 수행하여 평균 처리율을 비교한 것이다. 협대역 고정 절전 방법(그림의 Basic)의 경우 STA의 수가 약 20개인 지점에서 포화하여 최대 65.59 Mbps의 유효 처리량을 보였다. 반면 동적 대역폭 절전 기법의 경우(그림의 Proposed) STA의 수가 약 120개인 지점에서 포화하여 최대 332.19 Mbps의 평균 처리율을 보였다. 최대 유효 처리량을 비교하면 동적 대역폭 절전 기법이 협대역 고정 절전 방법 대비 약 5.06배 더 높은 성능을 보였으며 포화점도 약 6배 더 높은 것을 알 수 있다. 즉, 동적 대역폭 절전 기법을 사용하면 협대역 고정 절전 방법 대비 더 많은 STA를 수용하면서도 더 높은 평균 유효 처리량을 가질 수 있다. 또는, 유효 처리량이 동일하다면 전체 동작 시간 대비 협대역 대기 시간 비율이 높아져 절전 성능이 향상되었다고 볼 수 있다.

그림 7의 (c)는 경쟁하는 STA의 수 및 전송 데이터 크기에 따른 컴퓨터 모의실험을 수행하여 유효 처리량

을 비교한 것이다. 협대역 고정 절전 방법(그림의 Basic)의 경우 STA의 수가 약 20개인 지점에서 포화되기 때문에 STA 간 경쟁에 의한 충돌 확률이 높아진다. 따라서 전송에 성공한 패킷 수는 줄어들게 되며 패킷당 데이터의 크기가 증가하여도 유효 처리량이 증가하지 않았다. 하지만 동적 대역폭 절전 기법(그림의 Proposed)의 경우 포화점이 STA의 수가 80~120개인 지점에 형성되기 때문에 협대역 고정 절전 방법만을 사용한 절전 동작 대비 낮은 충돌 확률을 가짐을 알 수 있다. 따라서, 패킷당 데이터 크기가 증가함에 따라 유효 처리량이 함께 증가하는 모습을 볼 수 있다. 즉, 동적 대역폭 절전 기법은 AP가 절전 동작을 수행하면서도 STA의 요구에 따라 대용량 데이터 전송 또한 효과적으로 수행할 수 있음을 알 수 있다.

마지막으로 그림 7의 (d)는 경쟁하는 STA의 수 및 트래픽 도착 확률에 따른 컴퓨터 모의실험을 수행하여 평균 처리율을 비교한 것이다. 단위 시간 동안 STA의 Queue에 도착하는 트래픽의 수는 푸아송 분포를 따른다고 가정한다. 이때 트래픽 도착 확률이 높아짐에 따라 단위 시간당 도착하는 트래픽의 수가 증가하게 된다. 대기행렬 이론에 따르면 트래픽 처리율보다 트래픽 도착율이 높아지면 한 STA의 Queue는 포화된다. 많은 STA의 Queue가 포화되면 결국 네트워크에서 경쟁하는 STA의 수가 증가하게 되고 따라서 네트워크가 포화되기 쉬워진다. 이제 그림 7의 (d)에서 트래픽 도착 확률이 10-5인 경우를 살펴본다. 협대역 고정 절전 방법(그림의 Basic)은 STA의 수가 약 20개인 지점에서 포화되지만, 동적 대역폭 절전 기법(그림의 Proposed)은 STA의 수가 약 130개인 지점에서 포화된다. 즉, 동적 대역폭 절전 기법을 사용하면 협대역 고정 절전 방법 대비 더 높은 트래픽 도착 확률이 주어져도 네트워크가 포화되지 않고 높은 유효 처리량을 가질 수 있음을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 8세대 무선랜 표준의 주요 개발 목표인 AP의 절전 동작과 이를 위한 요구사항을 살펴보고, 협대역 고정 절전 방법의 문제점 및 AP를 위한 새로운 절전 동작의 필요성을 살펴보았다. AP의 절전 동작을 위한 동적 대역폭 절전 기법을 제안하였으며 협대역 고정 절전 방법과 새로 제안한 동적 대역폭 절전 기법을 컴퓨터 모의실험을 통해 분석하여 동적 대역폭 절전 기법의 우수성을 입증하였다.

제안한 동적 대역폭 절전 기법은 STA가 MU-RTS

프레임을 통해 대역폭 확장에 관한 정보를 AP에게 전달하고 AP는 이 정보를 사용하여 송수신 대역폭을 확장하여 통신하는 동작이었다. STA가 전송하는 MU-RTS는 AP의 CTS 프레임을 요청하게 되는데 이는 실제 데이터 전송까지 Overhead가 될 수 있다. MU-RTS 프레임 교환으로 인한 Overhead를 줄이면서 더 신속하게 데이터를 전송하는 방법은 미래 연구 주제이다.

References

- [1] C. Deng, et al., "IEEE 802.11be Wi-Fi 7: New challenges and opportunities," *IEEE Commun. Surv. & Tuts.*, vol. 22, no. 4, pp. 2136-2166, Fourthquarter 2020.
(<https://doi.org/10.1109/COMST.2020.3012715>)
- [2] IEEE Computer Society/LAN/MAN Standards Committee, *P802.11bn PAR*(2023), Retrieved Feb. 28, 2024, from <https://standards.ieee.org>
(<https://mypr-nodejs.standards.ieee.org/mypr-file/par/10639/mypr>)
- [3] L. T. Hyun and S. H. Rhee, "Power management of IEEE 802.11 WLAN using reinforcement learning," *J. KICS*, vol. 45, no. 2, pp. 340-343, Feb. 2020.
(<https://doi.org/10.7840/kics.2020.45.2.340>)
- [4] X. Lei and S. H. Rhee, "Enhancing IEEE 802.11 power saving mechanism (PSM) with a time slotted scheme," *J. KICS*, vol. 38, no. 8, pp. 679-686, Aug. 2013.
(<https://doi.org/10.7840/kics.2020.45.2.340>)
- [5] Y.-h. Zhu and V. C. M. Leung, "Efficient power management for infrastructure IEEE 802.11 WLANs," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 9, no. 7, pp. 2196-2205, Jul. 2010.
(<https://doi.org/10.1109/TWC.2010.07.081493>)
- [6] Q. Chen and Y.-H. Zhu, "Scheduling channel access based on target wake time mechanism in 802.11ax WLANs," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 20, no. 3, pp. 1529-1543, Mar. 2021.
(<https://doi.org/10.1109/TWC.2020.3034173>)
- [7] IEEE Computer Society/LAN/MAN Standards Committee, "802.11-2020 - IEEE Standard for

Information Technology--Telecommunications and Information Exchange between Systems - Local and Metropolitan Area Networks--Specific Requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications(2020)," Retrieved Mar. 2, 2024, from <https://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=9363691>
(<https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2021.9363693>)

- [8] Y. Ma, *AP Power Management*(2023), Retrieved Feb. 15, 2024, from <https://mentor.ieee.org/802.11/documents> (<https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/23/11-23-1835-00-00bn-ap-power-management.pptx>)
- [9] D. Halperin, et al., "Demystifying 802.11 n power consumption," in *Proc. 2010 Int. Conf. Power aware computing and systems, USENIX Assoc.*, p. 1, 2010.
- [10] O. Lee, J. Kim, and S. Choi, "WiZizz: Energy efficient bandwidth management in IEEE 802.11 ac wireless networks," *2015 12th Annual IEEE Inter. Conf. SECON*, pp. 136-144, 2015.

이 광 호 (Gwang-ho Lee)



2024년 8월 : 국립한국교통대학교
철도전기전자공학 졸업
(공학사)

2024년 9월~현재 : 국립한국교통대학교 일반대학원 철도전기전자공학과 석사과정

<관심분야> 무선통신네트워크, 무선랜

[ORCID:0009-0008-8718-2113]

안 우 진 (Woojin Ahn)



2006년 2월 : 연세대학교 전기전자공학과 졸업 (공학사)

2008년 2월 : 연세대학교 대학원 전기전자공학과 졸업 (공학석사)

2016년 8월 : 연세대학교 대학원 전기전자공학과 졸업 (공학박사)

2016년 3월~2019년 8월 : (주)윌러스표준기술연구소 선임연구원

2019년 9월~2023년 8월 : 한국철도기술연구원 선임연구원

2023년 9월~현재 : 국립한국교통대학교 철도전기정보공학과 부교수

<관심분야> 무선랜, 시민감네트워킹, 철도신호통신, 열차제어시스템

[ORCID:0000-0001-9892-9069]

김 용 호 (Ronny Yongho Kim)



1999년 2월 : 인하대학교 전자공학과 졸업 (공학사)

2004년 2월 : 연세대학교 대학원 전기전자공학과 졸업 (공학석사)

2010년 2월 : 연세대학교 대학원 전기전자공학과 졸업 (공학박사)

2007년 9월~2008년 3월 : University of Toronto, 전기컴퓨터공학과 방문연구원

2017년 7월~2018년 8월 : North Carolina State University, 전기컴퓨터공학과 방문교수

2012년 2월~현재 : 국립한국교통대학교 철도전기정보공학과 교수

2010년 8월~현재 : IEEE Senior Member

<관심분야> 무선통신네트워크, 사물인터넷, 무선랜, 이동체통신

[ORCID:0000-0003-0385-5672]