



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

이 일 구 교수 지도

석사학위 청구논문

재난안전통신망을 위한 간섭 인지
동적 대역폭 할당 전송 기법

2023

성신여자대학교 대학원

미래융합기술공학과

박 태 림

재난안전통신망을 위한 간섭 인지 동적
대역폭 할당 전송 기법

이 일 구 교수 지도

이 논문을 석사학위논문으로 제출함

2022년 11월

성신여자대학교 대학원

미래융합기술공학과

박 태 림

인 준 서

박태림의 석사학위 논문으로 인준함

2022년 11월

심사위원장 김 성 민 (서명 또는 인)

심 사 위 원 이 일 구 (서명 또는 인)

심 사 위 원 임 연 섭 (서명 또는 인)

성신여자대학교 대학원

논문개요

최근 테러 위협과 국가 재난 상황으로부터 국민의 생명과 재산을 보호하기 위해 국가에서 재난안전통신망을 구축하고 있다. 재난안전통신망은 재난 상황 시 신속하고 안전한 구조 활동을 위해 필수적이다. 하지만 종래의 재난안전통신망은 총 20MHz의 좁은 대역폭을 할당하고 있기 때문에 UHD 비디오 및 실시간 통신과 같은 고속 전송 통신 서비스를 제공할 수 없다. 그리고 LTE-R이나 LTE-M과 동일 주파수 대역을 사용하기 때문에 간섭 문제가 있으며, 재난안전통신망은 낮은 주파수 대역의 특성상 장거리 전송이 가능하여 재밍과 같은 고의적인 전파 방해 공격이나 다수의 사용자로 인한 비고의적 간섭에 의한 통신 효율성 저하 문제가 있다.

본 논문에서는 종래의 문제를 해결하기 위하여 802.11ah와 TV White Space를 동시에 이용하는 간섭 인지 동적 대역폭 할당 기법을 제안하고자 한다. 본 논문에서 제안한 아이디어는 간섭을 감지하여 사용자에게 동적 대역폭 할당을 통해 사용 가능한 채널의 대역폭을 제공한다. 동적 대역폭 할당 방식에 의해 할당받은 채널을 캐리어 어그리게이션 기법으로 고효율 데이터 전송을 통해 대역폭 증가에 비례하여 성능을 개선할 수 있다. 본 논문에서 제안한 아이디어는 Shannon Theorem를 통해 개선된 채널 용량을 보인 뒤 시뮬레이션을 통해 증명한다.

목 차

논문개요

I. 서론	1
II. Background and Probe Scope	6
1. 재난안전통신망	7
2. 대역폭	7
3. IEEE 802.11ah	7
4. TV White Space	8
5. 동적 대역폭 할당	9
6. 캐리어 어그리게이션	9
III. 관련 연구	10
1. 재난안전통신망	10
2. TV White Space	14
3. IEEE 802.11ah	15
IV. 간접 인지 동적 대역폭 할당 전송 기법	17
1. 간접 인지 동적 대역폭 할당 전송 기법	17
2. 간접 인지 동적 대역폭 할당 전송 기법 이론적 분석	22

V. 성능 평가	25
1. 실험 환경	25
2. 실험 결과 및 분석	30
VI. 결론	41

ACKNOWLEDGEMENTS

참고문헌

ABSTRACT

표 차 례

TABLE I. TV White Space U.S. 6MHz Channels	8
TABLE II. Previous Research on Public Safety-LTE	13
TABLE III. Value of Set Bandwidth	22
TABLE IV. MCS Parameters	26
TABLE V. Value of the Interference Case	29
TABLE VI. Simulation Parameters according to the Rate of Interference Change	30

그림 차례

FIGURE 1. Probe Scope	6
FIGURE 2. Interference Aware Dynamic Bandwidth Allocation Transmission Technique Mechanism	18
FIGURE 3. Interference Aware Dynamic Bandwidth Allocation Transmission Technique Flow Chart	19
FIGURE 4. Carrier Aggregation of the Proposed Technique	20
FIGURE 5. Channel capacity according to Shannon Theorem	23
FIGURE 6. 802.11ah Packet Error Rate Simulation for 2x2 TGah Channel	27
FIGURE 7. 802.11ah Packet Error Rate	28
FIGURE 8. Latency of Interference Case1	31
FIGURE 9. Latency of Interference Case2	32
FIGURE 10. Latency of Interference Case3	32
FIGURE 11. Latency of Interference Case4	33
FIGURE 12. Latency of Interference Case1 in Transmit Limit	34
FIGURE 13. Latency of Interference Case2 in Transmit Limit	35
FIGURE 14. Latency of Interference Case3 in Transmit Limit	35
FIGURE 15. Latency of Interference Case4 in Transmit Limit	36
FIGURE 16. Throughput of Interference Case1 in Transmit Limit	37

FIGURE 17. Throughput of Interference Case2 in Transmit Limit
..... 38

FIGURE 18. Throughput of Interference Case3 in Transmit Limit
..... 38

FIGURE 19. Throughput of Interference Case4 in Transmit Limit
..... 39

I. 서론

재난안전통신망(PS-LTE, Public Safety-LTE)은 경찰, 소방, 군 등 재난에 관련된 업무를 수행하는 기관들이 재난 상황 시 통신을 위해 사용하는 무선 통신망이다[1]. 국가는 국민의 안전을 도모하고 재산을 보호해야 하는 의무가 있으므로 경찰, 소방, 군, 의료 등 공공 안전 기관에 미션 크리티컬의 상황에서도 통신 시스템을 제공할 책임이 있다[2, 3]. 이에 따라 국가 재난 상황 및 테러 위협으로부터 자국민의 재산권을 보호하고 안전을 도모하기 위한 재난안전통신망의 필요성이 대두되었다.

미국, 영국, 한국 등 많은 국가에서 재난 대응 및 안전 기관과 정보를 공유하고 신속한 통신을 위해 전국적인 이동 통신망 인프라로 재난안전통신망을 구축하고 있다[4, 5]. 재난안전통신망은 공공으로 구축되기 때문에 대부분 국가에서 주도하고 있으며[6], 각 국가의 통신 환경과 요구 사항을 기반으로 구축되고 있다. 재난안전통신망의 표준화는 2013년 3GPP의 릴리스 12에서 LTE에 ProSe(Proximity-Based Service), GCSE(Group Communication System Enabler) 시스템 기능이 정의되면서 시작되었다[4]. 이후 릴리스 13에서는 MCPTT(Mission-Critical Push-to-Talk) 서비스 및 IOPS(Isolated E-UTRAN Operation for Public Safety)에 대한 기능을 추가하여 정의하고 있다.

재난안전통신망은 LTE와 동일한 성격을 갖고 있어 스케줄링 방식을 사용한다. LTE는 3GPP에 명시된 바와 같이 지상 무선 접근 네트워크(EUTRAN) 및 EPC(Evolved Packet Core)로 구성된다[7]. 무선 접근 네트워크 부분인 EUTRAN은 eNB(evolved NodeB) 기지국으로 구성되며, LTE 네트워크와 사용자 장비(UE) 간의 안정적인 RF(Radio Frequency) 전송을 담당한다. 데이터 평면에서 eNB는 RF 링크를 통한 안정적인 전달,

무선 인터페이스 데이터 암호화, 헤더 압축 및 무선 프로토콜 스택을 통한 무결성 보호를 담당한다[7]. 제어 평면에서 eNB는 RRC(Radio Resource Control) 프로토콜 스택을 통한 승인 제어, 무선 베어러(Bearer) 제어 및 스케줄링을 포함한 RRM(Radio Resource Management)을 담당한다[7].

미국의 재난안전통신망인 First Net을 기준으로 주파수는 758MHz-768MHz와 788MHz-798MHz로 총 20MHz 대역폭을 할당받고 있다. 한국은 718MHz-728MHz와 773MHz-783MHz로, 미국과 동일하게 총 20MHz의 좁은 대역폭을 재난안전통신망에 활용하고 있다. 최근에는 효율적인 재난 상황 대응을 위해 재난안전통신망에 멀티미디어 공유나 화상 통화 및 라이브 비디오 스트리밍과 같은 서비스를 적용하고 있다[7]. 그러나 종래의 재난안전통신망은 좁은 대역폭 할당으로 UHD급 영상과 라이브 비디오 등과 같은 고속 전송 통신이 필요한 서비스를 제공하기 어렵다.

좁은 대역폭 문제 외에도 재난안전통신망의 동일 주파수 내 네트워크 공존으로 인한 간섭 문제는 지속해서 제기되어 왔다. 현재 대역폭에는 LTE-M, LTE-R과 같은 다른 네트워크가 공존하고 있지만 재난안전통신망은 스케줄링 방식과 같은 LTE 통신 방식을 이용하기 때문에 간섭이 발생하면 유동적으로 대응할 수 없다. 네트워크 공존 및 좁은 대역폭 할당으로 인한 채널 간섭 발생과 통신 충돌로 인해[1], 실시간성과 저지연이 중요한 고화질 데이터 통신, 실시간 화상 통화, 라이브 비디오 스트리밍 등은 재난안전통신망에서 사용하기 적합하지 않다는 문제를 지니고 있다[8]. 그러나 재난안전통신망을 통해 UHD급 비디오 및 라이브 비디오 스트리밍 등 고속 전송이 필요한 멀티미디어를 활용하여 재난 구조 작업의 효율성을 높여야 한다. 재난 상황 시 시급성을 보장하기 위해 넓은 대역폭을 확보하고 간섭에 동적으로 대응하여 시급성을 보장할 필요가 있다. 따라서 재난안전통신망을 재해 발생과 같은 동적으로 변화하는 상황에 따라 요구 사항

및 우선순위가 다르므로[9], 기존 LTE 네트워크의 아키텍처를 효율적이고 적시에 대응할 수 있는 시스템으로 변경할 필요가 있다.

종래의 많은 연구는 재난안전통신망의 효율성을 개선하고 네트워크 공존으로 인한 간섭을 줄이기 위해 동일 주파수에서 동작하는 LTE-M과 LTE-R을 고려하여 사용자 우선순위에[1], 로드 밸런싱을 통해 모바일 개인 셀 분류 등의 기준을 따르는 우선순위 기반 알고리즘을 제안하였다. 전파 발생을 감지하면 네트워크 상태를 동기화하거나 처리량을 기반으로 중계기를 선택하는 방식을 제시하였으며, 성능 향상을 위해 드론을 이용하여 재난안전통신망의 통신 거리를 증가시키는 연구가 제안된 바 있다. 이 외에도 종래의 선행연구는 재난안전통신망의 20MHz라는 좁은 대역폭으로 인한 통신 성능 저하를 개선하고자 했지만, 700MHz 주파수 내에서 동작하는 LTE-M과 LTE-R의 공존 문제를 해결하지 못했으며 LTE 통신의 특성상 통신 중 발생하는 간섭에 유동적으로 대응할 수 없는 한계를 극복하지 못했다. 간섭 문제를 극복하고 재난통신망의 효율성 향상을 위해 종래의 LTE 통신 방식에서 벗어나, 다른 주파수 대역에서 동작하는 메커니즘을 활용할 필요가 있다. 더 나아가 동적으로 변화하는 환경에 따라 유연하게 동작하여 재난 상황이나 긴급한 상황에서도 시급성을 보장할 수 있도록 개선해야 한다.

따라서 본 연구에서는 802.11ah와 TV White Space를 결합하여 이용하는 재난안전통신망을 위한 간섭 인지 동적 대역폭 할당 전송 기법을 제시하고자 한다. 제안된 아이디어는 간섭에 따라 802.11ah와 TV White Space 대역 중 사용 가능한 채널을 파악한 후, 동적 대역폭 할당을 통해 사용자에게 대역폭을 할당하여 간섭에 유동적으로 대응한다. 할당받은 대역폭을 기반으로 캐리어 어그리게이션을 통해 향상된 대역폭을 사용할 수 있도록 하여 대역폭에 비례하여 개선된 전송속도로 통신을 진행한다.

종래의 연구와 비교했을 때, 본 연구의 기여점은 다음과 같다.

첫째, 간섭에 유동적으로 대응할 수 있는 메커니즘을 제안한다.

둘째, 재난안전통신망의 좁은 대역폭 문제를 해결한다.

셋째, 재난안전통신망의 700MHz 주파수 대역의 네트워크 공존 문제를 개선한다.

현재 재난안전통신망은 LTE의 스케줄링 특성으로 인해 통신 진행 중 발생하는 간섭에 유동적으로 대응하지 못해 통신 효율성이 떨어진다. 제안하는 간섭 인지 동적 대역폭 할당 전송 기법을 통해 간섭을 감지하여 사용자에게 채널을 유동적으로 할당할 수 있다. 전송 중 간섭으로 인해 전송 에러가 발생할 경우, 사용 가능한 채널 다시 탐색하며 동적 대역폭 할당을 통해 사용자에게 채널을 재할당함으로써 간섭에 유동적으로 대응할 수 있도록 한다.

재난안전통신망은 총 20MHz의 좁은 대역폭을 할당받고 있다. 간섭 인지 동적 대역폭 할당 전송 기법의 핵심이 되는 900MHz 대역의 802.11ah는 총 26MHz의 대역폭을 보유하고 있으며 TV White Space는 600MHz 대역 주파수를 기준으로 총 30MHz 대역폭을 보유하고 있다. 본 논문에서 제안하는 아이디어를 통해 20MHz보다 넓은 대역폭을 사용함으로써 재난안전통신망의 좁은 대역폭 문제를 해결할 수 있다.

재난안전통신망의 주파수는 700MHz로, LTE-R과 LTE-M이 공존하고 있다. 제안된 기법은 900MHz 주파수 대역의 802.11ah 및 600MHz 주파수 대역의 TV White Space의 사용을 통해 700MHz 주파수 대역에서 벗어나 네트워크 공존으로 인한 간섭 및 통신 충돌의 문제를 해결할 수 있다.

본 논문의 구조는 다음과 같다. II장에서는 본 논문에서 주요하게 다루는 개념에 관해 서술한다. III장에서는 선행연구를 분석한다. IV장에서는 제안한 통신 메커니즘 및 구조에 관해 서술한 후, Shannon Theorem 이론에

기반하여 간접 인지 동적 대역폭 할당 전송 기법의 성능 개선을 이론적으로 증명한다. V장에서는 시뮬레이션 환경 및 실험 결과를 해석한다. 마지막으로 VI장에서는 결론 및 향후 연구에 관해 서술한 후 마무리한다.

II. Background and Probe Scope

본 장에서는 논문에서 고려하고 있는 시스템에 대해 전체적인 개괄을 제시하고자 한다.

다음 FIGURE 1은 본 연구에서 고려하고 있는 시스템을 나타낸다.

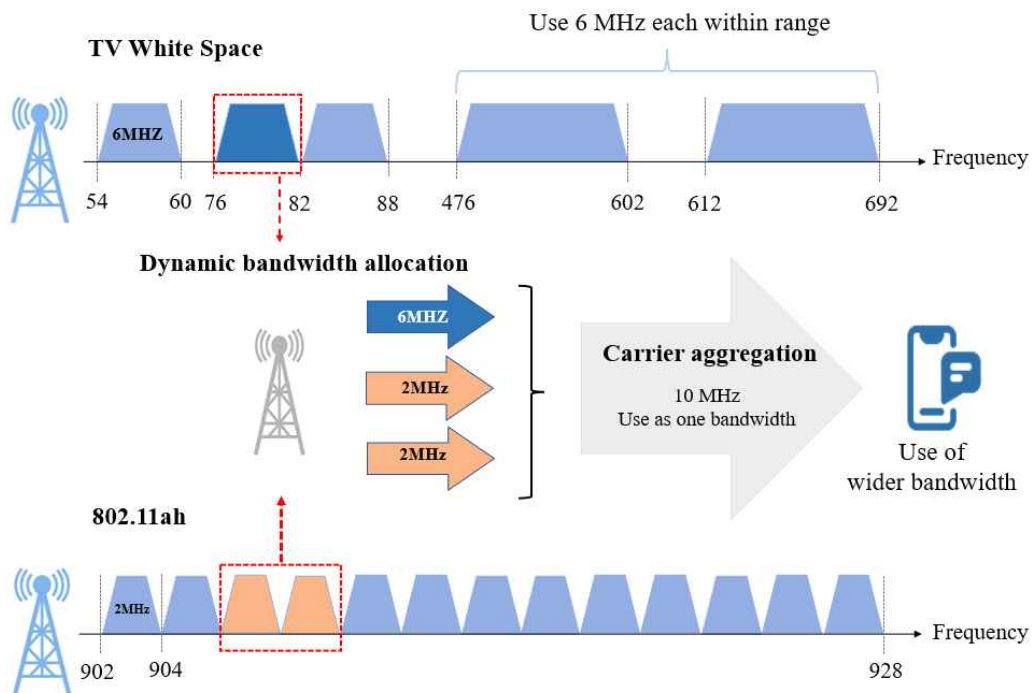


FIGURE 1. Probe Scope

1. 재난안전통신망

재난안전통신망은 LTE 통신 기술을 기반으로 하여 경찰, 소방, 군 등 재난에 관련된 업무를 수행하는 기관들이 재난 대응 시 통신을 위해 사용하는 무선 통신망이다[1]. 재난안전통신망은 미션 크리티컬의 상황에서도 최소한의 통신을 보장할 수 있는 신뢰성과 상호 운용성, 재난 대응성을 갖추고 있어야 한다. 다음 FIGURE 1의 재난안전통신망은 현재 미국의 재난안전통신망인 First Net을 기준으로 나타냈다. First Net은 758MHz-768MHz와 788MHz-798MHz를 사용하고 있어 총 20MHz의 대역폭을 보유하고 있다. 한국은 미국과 같이 총 20MHz의 좁은 대역폭을 할당받고 있으며, 718MHz-728MHz와 773MHz-783MHz 주파수를 사용하고 있다.

2. 대역폭

대역폭은 네트워크 전송 환경에서 데이터의 왜곡이나 손실 없이 데이터를 전달하는 데 필요한 주파수 범위로, 데이터 전송 시 한 번에 처리가 가능한 데이터의 양을 나타낸다. 대역폭이 너무 좁으면 데이터 손실이 발생할 수 있으며, 대역폭이 너무 넓으면 데이터 전송 속도가 증가하지만 잡음이 전달될 수 있다.

3. IEEE 802.11ah

IEEE 802.11ah는 WiFi 표준이다. IEEE 802.11ah는 2017년에 발표된 무선 네트워킹 프로토콜로, IEEE 802.11-2007 무선 네트워킹 표준 개정에 따라 WiFi HaLow라고 불리기도 한다. 2.4GHz 및 5GHz 대역에서 동작하는 기존 WiFi 네트워크와 비교했을 때, 더 넓은 확장 범위의 WiFi 네트워크를 제공하고자 900MHz 대역을 사용한다. 이 규격은 2016년 9월에 승인되어, 2017년 5월에 상용되었다. 한국은 802.11ah 주파수 대역으로 917.5MHz

-923.5MHz를 할당받고 있으며, 미국은 902MHz-928MHz 대역을 할당받고 있다[10].

4. TV White Space

다음 TABLE I은 6MHz의 TV White Space 채널을 재구성한 것이다 [11].

TABLE I
TV White Space U.S. 6MHz Channels

TV White Space Channel	Range(MHz)	Channel Width
2	54 - 60	6MHz
5	76-82	6MHz
6	82-88	6MHz
14 - 35	476 - 602	6MHz
38-51	612 - 692 or 620 - 698	6MHz

각 국가의 규정에 따라 유럽의 경우 TV White Space의 대역은 470MHz-790MHz 주파수 대역을 사용하고 있으며, 미국은 54MHz-698MHz 주파수 범위에서 동작한다[11].

5. 동적 대역폭 할당

802.11ah와 TV White Space는 동적 대역폭 할당 기술을 포함하고 있어 대역폭을 효과적으로 사용할 수 있다. 동적 대역폭 할당은 대역폭 관리 프로세스의 일부로, 통신 매체의 대역폭을 사용자의 필요에 따라 공정하게 대역폭을 할당하는 기술이다. 이 기술을 사용하면 네트워크에서 발생하는 트래픽 양의 변화와 간섭 등을 고려하여 애플리케이션에 필요한 대역폭을 할당할 수 있다. 이 과정을 통해 변화하는 네트워크 환경에 대해 빠르고 쉽게 대응할 수 있으므로 리소스가 부족하여 하나의 애플리케이션을 실행할 수 없는 상황을 피할 수 있다.

6. 캐리어 어그리게이션

동적 대역폭 할당을 통해 사용자에게 할당된 여러 개의 대역폭을 하나의 대역폭으로 사용할 수 있도록 하는 캐리어 어그리게이션이 있다. 캐리어 어그리게이션은 이동통신 기술인 LTE 어드밴스를 구성하는 핵심 기술 중 하나로, 무선 통신에서 사용자의 데이터 속도를 높이는 데 사용된다. 동일한 사용자에게 여러 주파수 블록이 할당되면, 파편화되어 있는 주파수를 하나의 대역으로 묶어서 사용하게 한다. 사용자의 최대 데이터 전송률은 할당된 주파수 블록이 많을수록 증가한다.

Ⅲ. 관련 연구

본 장에서는 재난안전통신망과 802.11ah 및 TV White Space를 기반으로 진행된 선행연구를 살펴보고자 한다.

1. 재난안전통신망

최근 재난안전통신망과 관련하여 무선 통신 간의 간섭에 의한 충돌을 줄이고 통신 성능을 개선하기 위한 연구가 진행되고 있다. 재난안전통신망의 통신 효율성을 개선한 종래의 연구는 다음과 같다.

Random-Access를 통해 User Equipments(UEs)와 연결할 때 재난안전통신망과 동일한 주파수에서 동작하는 LTE-M과 발생할 수 있는 과부하 문제를 해결하고자 하였다[12]. 문제 해결을 위해 Mission-Critical High Priority(MCHP) 기반의 Random-Access 방식을 제안하였다. 제안된 아이디어는 기존의 방식에 비해 충돌 및 Access Latency, Random-Access 채널 시도 횟수 방면에서 효율성을 증가시켰다. 그러나 LTE-M 통신과 경합이 존재하지 않는 구간에서는 성능 개선이 미미했으며, 오버헤드가 발생할 수 있다는 한계가 있다.

LTE(Long Term Evolution) 네트워크의 공존 및 협력을 위한 자원 할당과 동일한 채널의 간섭 관리 문제를 해결하고자 하였다[1]. LTE-R RAN(Radio Access Network)의 자원 공유와 재난안전통신망의 UE(User Equipment)에 의한 Non-RAN 공유를 고려하여 재난안전통신망과 LTE-R 네트워크가 공존하는 하향링크 시스템에 초점을 맞추어 간섭을 줄였다. CoMP(Coordinated Multipoint) 및 ICIC(Inter-Cell Interference Coordination)와 같은 기술을 사용하여 UE(User Equipment) 평균 처리량, UE 수신 간섭

및 UE 중단 확률과 같은 다양한 성능 지표를 기반으로 각 시나리오의 성능을 평가했다. 종래의 연구에서는 재난안전통신망과 다른 종류의 네트워크가 동일한 주파수를 사용함으로써 발생할 수 있는 간섭 문제를 해결하기 위한 메커니즘을 제시했다는 기여점이 있다.

이 외에도 부족한 스펙트럼 할당 대역 문제를 해결하기 위해 재난안전통신망을 위한 재해 복원력을 갖춘 3계층 아키텍처인 DR PS-LTE를 제안한 연구가 있다[8]. 제안된 아키텍처는 중앙 제어를 제공하는 SDN 계층, 엣지 컴퓨팅을 용이하게 하거나 비상 통신 링크를 활성화하는 UAV 클라우드 계층과 무선 접근 계층으로 구성되어 있다. DR PS-LTE 아키텍처는 재난안전통신 서비스의 지연 요구 사항을 효율적으로 충족하기 위해 SDN과 엣지 컴퓨팅의 이점을 결합했다. 해당 연구에서는 재난안전통신망의 좁은 대역폭 문제로 발생할 수 있는 간섭 문제를 해결하고 통신 효율성을 위해 SDN과 엣지 컴퓨팅의 이점을 결합하는 메커니즘을 제안했다는 기여점이 있다.

재난안전통신망의 성능 향상을 초점으로 진행된 종래의 연구는 다음과 같다. 재난안전통신망 환경에 IoLST(Internet of Life-Saving Things)의 개념을 도입하여 웨어러블 기기의 역할에 초점을 맞추고자 했다[13]. 향상된 공공 안전 운영을 목표로 새로운 솔루션을 제안하기 위해 셀룰러를 지원하는 웨어러블을 이용하였다.

재난 안전 네트워크(Public Safety Network, PSN) 및 공공 안전 통신 분야에서 전력 소비 문제를 해결하고자 클러스터링 알고리즘을 사용하는 클러스터 HEAd 선택 기법(CHESS-PC)을 제안했다[14]. 클러스터링 도구로 퍼지 C-평균 접근 방식과 함께 적절한 클러스터 헤드(CH) 선택은 무선 네트워크의 전력을 효율적으로 사용하도록 했다. 시뮬레이션을 통해 제안된 방식의 네트워크 전력 소모량이 감소되는 것을 보여주었다.

또 다른 연구에서는 재난 안전 네트워크 환경을 개선하고 물리적 재해 또는 특수 공격으로 인한 백본 네트워크 장애에 대처하고자 했다[15]. 제안된 방식은 효율적인 에너지 자원 관리를 위한 모바일 기지국의 최적의 위치를 계산하는 동적 프레임워크를 제시했다.

재난안전통신망의 통신 성능 향상을 초점으로 진행된 종래의 연구는 재난안전통신망에서 사용되는 디바이스들의 배터리 사용량을 조절하거나 최적의 위치를 계산하는 메커니즘을 통해 디바이스 사용 시간을 늘렸다. 이와 같은 종래의 연구는 통신을 효율적으로 진행하기 위한 메커니즘을 제시했다는 기여점이 있다.

재난안전통신망을 기반으로 진행된 종래의 연구는 주로 좁은 대역폭과 동일 주파수 내 네트워크의 공존으로 인한 간섭 문제를 해결하거나, 재난안전통신망 내 사용되는 기기들의 배터리 소비 전력을 조절하여 성능을 향상하고자 하였다. 동일한 주파수 대역에서 다른 무선 네트워크와의 공존 문제를 해결하기 위해 Random-Access와 같이 우선순위를 할당하고자 했지만, 결국 동일한 주파수를 사용하는 한계를 극복하지 못했다. 이 외에도 재난안전통신망에서 활용되는 디바이스의 성능 향상을 진행했지만 좁은 대역폭 문제를 고려하지 못했으며, 간섭 인지를 통해 대역폭을 동적으로 활용하여 통신 효율성을 확보하지 못했다는 한계점이 있다.

TABLE II
Previous Research on Public Safety-LTE

Previous research	Issues	Methods	Ref.	Main idea
	narrow bandwidth	3-Layer architecture	[8]	Proposed 3-layer structure composed of UAV cloudlet layer and radio access layer
Public Safety-LTE Interference	Multiple network coexistence	High Priority (MCHP) based random-access	[12]	Grant random-access in LTE-M and PS-LTE
		Coordinated Multipoint (CoMP) and Inter-Cell Interference Coordination (ICIC)	[1]	Consider LTE-R RAN (radio access network) and non-RAN downlink system
		IoLST(Internet of Life-Saving Things)	[13]	Introducing the concept of Public Safety to the Internet of Life-Saving Things(IoLST)
Public Safety-LTE performance improvement	Extend PSN Battery Life	A dynamic framework to calculate the optimal location of a base station	[15]	Proposal of a dynamic framework to calculate the optimal location of a mobile base station
		Cluster-Head Selection Technique (CHESS-PC)	[14]	Efficient use of power with fuzzy C-means approach and cluster head (CH) selection

2. TV White Space

TV White Space 선행연구는 주로 통신 매체의 성능을 높이고자 했다. TV White Space를 기반으로 진행된 선행연구는 다음과 같다.

TV White Space 네트워크에 대한 종래의 연구를 조사 및 분석한 연구가 있다[16]. TV White Space를 활용한 무선 광대역 접근, 애플리케이션, 농업 IoT 등과 같은 장거리, 저전력 애플리케이션을 고려했다. 이 외에도 TV White Space에서 애플리케이션을 활성화하기 위해 해결해야 할 1차 사용자(Primary User, PU)와 2차 사용자(Secondary User, SU) 간의 간섭 처리와 동종 및 이종 응용 프로그램의 공존 관리, TV White Space 스펙트럼 및 안테나 설계, 이동성 및 보안 등의 주요 연구 과제를 식별하여 제시했다.

자율주행 자동차 통신에 TV White Space 스펙트럼을 적용하여 통신 성능을 개선하고자 하였다[17]. TV White Space를 분산 공동 채널 및 전력 할당에 이용하여, 동일한 채널에서 전송하는 인접한 1차 사용자 및 다른 2차 사용자에게 간섭이 발생하지 않도록 했다. 시뮬레이션 분석 결과 제안된 최적화 기법은 네트워크 QoS를 유지하면서 높은 처리량을 달성했다.

또 다른 연구로는 TV White Space 이종 네트워크 및 응용 시스템 간 환경에서 TV 스펙트럼의 공유가 무시되는 문제를 다루고자 했다[18]. 문제 해결을 위해 Geolocation 데이터베이스와 이종 애플리케이션 시스템 간의 TV 스펙트럼을 연구하는 메커니즘을 설계하여 제시하였다. 스펙트럼 공유 문제를 0-1 정수 최적화 문제로 공식화했으며, 제안된 근사 알고리즘이 훨씬 적은 복잡성으로 최적에 가까운 솔루션을 얻을 수 있음을 보여주었다.

농촌 지역 환경에서 광대역 인터넷 및 디지털 서비스를 제공하는 방안으로 TV White Space를 제안하였다[19]. 해당 연구에서는 농촌 지역의 클라이언트에게 라이브 인터넷 서비스를 제공함으로써 얻는 성능을 확인하기

위해 실내 테스트와 실외 테스트를 통해 TV White Space 기반 광대역 인터넷 연결을 평가했다.

TV White Space 선행연구는 다른 통신 환경과 결합하기 위한 스펙트럼 분석을 진행했으며 자율주행, 스마트 그리드 등에서 타 통신과 결합하여 통신 환경을 개선하고자 하였다. 이 외에도 TV White Space 채널 결합을 통해 더 넓은 대역폭과 가용성을 확보했다는 기여점이 있다. 하지만 TV White Space 대역폭을 재난안전통신망에 적용해 대역폭을 개선하거나, 간섭에 대해 유동적으로 대응하고자 한 연구는 부족했다.

3. IEEE 802.11ah

IEEE 802.11ah를 중심으로 진행된 선행연구는 다음과 같다.

먼저, 사물 인터넷(IoT)에서 IEEE 802.11ah의 성능을 개선하기 위한 연구로는 IoT 환경에서 사용되는 IEEE 802.11ah의 리소스를 재사용한 연구가 있다[20]. 지리적으로 섹터화된 그룹화를 통해 제한된 접근 환경에서 매체 접근 메커니즘을 제안하였다. 제안된 메커니즘은 기존 IEEE 802.11ah 표준보다 높은 패킷 전달 비율과 시스템 처리량을 제공했다. 이 외에도 고유한 속도의 STA의 특성으로 낮은 속도의 STA에 의해 높은 속도의 STA가 전송에 더 많은 채널 시간을 소비하는 문제를 해결하고자 했다[21]. 문제 해결을 위해 본 논문에서는 달성 가능한 데이터 전송률을 기반으로 한 RAW 슬롯 할당(RSA) 기법을 제시하였다.

또 다른 연구로 IEEE 802.11ah의 성능을 다양한 환경에서 분석하고자 한 연구가 있다. 다중 모드 작동을 위한 IEEE 802.11ah의 성능 및 처리량을 분석하였으며[22], 양방향 TCP/IP 트래픽이 있을 때 RAW(Restricted Access Window) 그룹화 및 TIM(Traffic Indication Map) 세분화라는 두 가지 주요 메커니즘이 확장성, 처리량, 대기 시간 및 에너지 효율성 측면에

어떠한 영향을 주는지 분석하고자 했다[23].

종래의 IEEE 802.11ah 연구는 사물 인터넷(IoT)이나 다중 네트워크 환경에서의 IEEE 802.11ah의 성능을 분석했다는 기여점이 있다. 하지만 802.11ah의 주요 특징인 에너지 소비율이 낮고, 장거리 통신이 가능한 장점을 IoT 환경에 초점을 맞추어 연구를 진행했다는 한계점이 있다.

따라서 본 연구에서는 종래 연구의 한계점인 좁은 대역폭과 동일 주파수 내 네트워크의 공존 문제, 간섭에 대해 유동적으로 대응하지 못하는 문제를 해결하고자 한다. 802.11ah와 TV White Space의 통신 대역을 이용하여 확장성과 유연성을 포함하는 재난안전통신망을 위한 간섭 인지 동적 대역폭 할당 전송 기법을 제시하고자 한다.

IV. 간섭 인지 동적 대역폭 할당 전송 기법

본 장에서는 간섭 인지 동적 대역폭 할당 전송 기법의 메커니즘에 대해 서술한 후, 제안된 아이디어의 채널 용량이 Shannon의 이론에 의해 개선 되는 것을 이론적으로 보이고자 한다.

1. 간섭 인지 동적 대역폭 할당 전송 기법

다음 FIGURE 2는 간섭 인지 동적 대역폭 할당 전송 기법의 구성도를 나타낸 것이다. 간섭 인지 동적 대역폭 할당 전송 기법의 구성 요소는 통신에 참여하는 사용자의 장치, 운영기관, 재난안전통신망의 기지국과 802.11ah 및 TV White Space 대역을 사용하는 기지국이 있다. 사용자의 장치는 LTE 어드밴스드 및 WiFi를 선택하여 사용할 수 있다. 운영기관은 재난안전통신망의 시스템을 모니터링하며, 재난 대응을 주관하는 관리기관이다.

802.11ah 기지국은 900MHz 대역이며, TV White Space의 기지국은 600MHz를 사용하고 있으므로 서로 다른 주파수 대역에서 동작하고 있다. 각각의 기지국에는 기지국 제어기 및 송신 신호를 방사하는 송신 안테나와 신호를 감지하는 수신 안테나로 구성되어 있다. 송신 및 수신 안테나는 기지국 위치에 고정되어 있다. 기지국 제어기를 통해 송신 및 수신되는 신호 처리를 제어하며 기지국의 메인 컨트롤러를 통해 사용자의 장치로부터 통신 요청을 받고, 타 기지국에 통신 요청 및 대역폭 할당 요청을 진행할 수 있다. 재난안전통신망 기지국이 802.11ah 및 TV White Space의 기지국에 대역폭을 요청하면 주파수 대역 중 사용할 수 있는 대역을 재난안전통신망 기지국에 제공한다. 재난안전통신망의 기지국은 제공받은 대역을 하나의

대역폭 형태로 사용자 장치에게 통신 환경을 제공하게 된다.

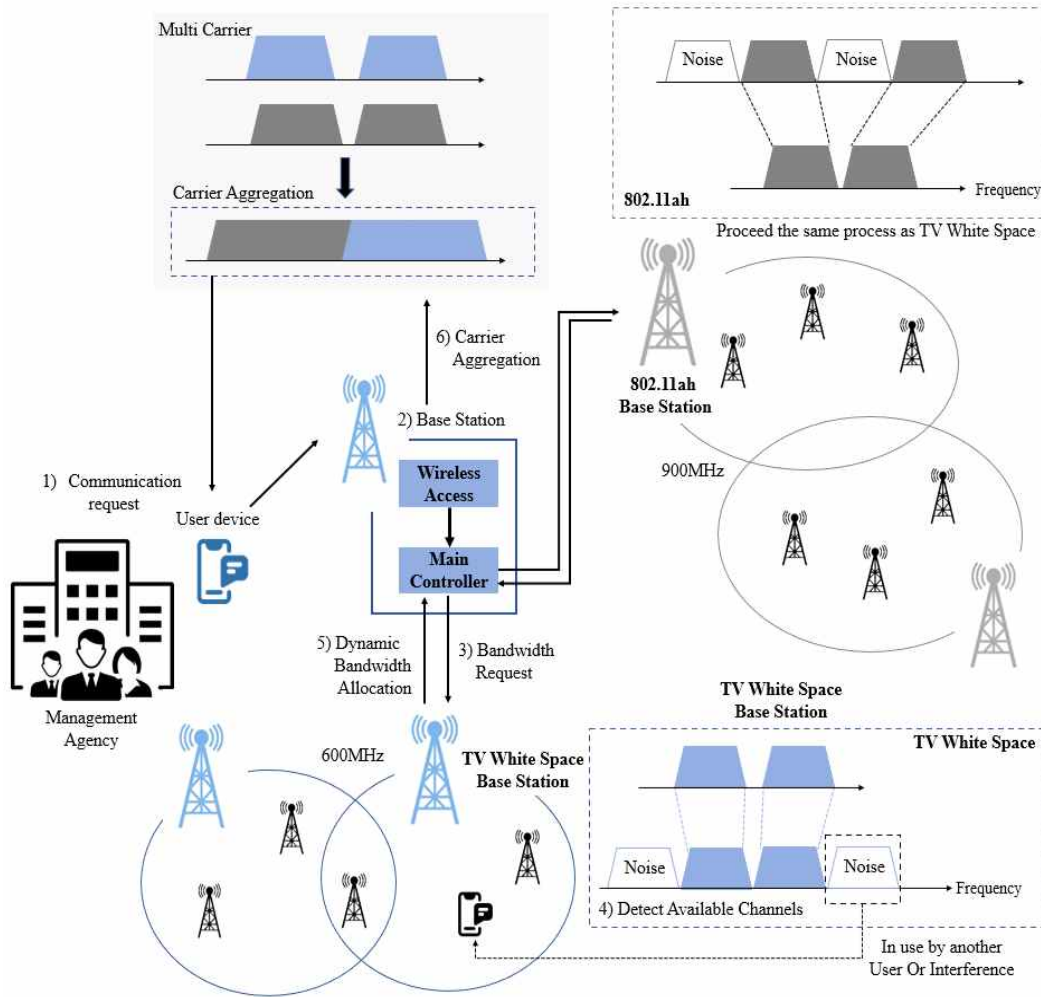


FIGURE 2. Interference Aware Dynamic Bandwidth Allocation Transmission Technique Mechanism

다음 FIGURE 3은 간섭 인지 동적 대역폭 할당 전송 기법의 흐름도를 나타낸 것이다.

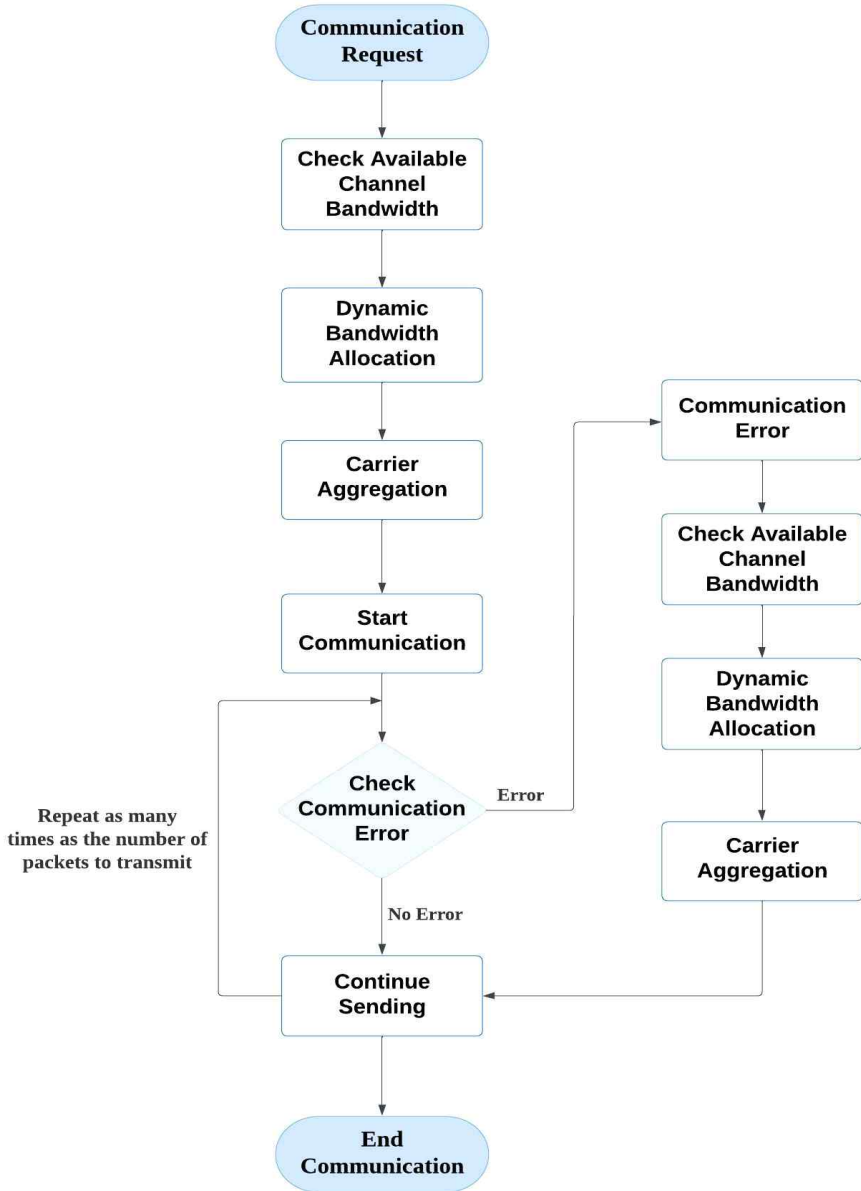


FIGURE 3. Interference Aware Dynamic Bandwidth Allocation Transmission Technique Flow Chart

통신 요청이 들어오면 TV White Space와 802.11ah 주파수 대역 중 사용 가능한 채널을 감지한다. 이때, 감지된 채널은 다른 통신 매체 및 다른 사용자가 사용하지 않는 채널이다.

감지된 채널을 동적 대역폭 할당을 통해 사용자에게 대역폭을 제공한다 [24]. 이때, 채널의 사용 여부, 간섭 여부 등을 종합적으로 고려하여 동적 대역폭 할당(DBA, Dynamic Bandwidth Allocation) 알고리즘을 통해 사용자에게 대역폭을 할당한다[25, 26]. 사용자의 대역폭은 전송 속도 향상을 위해 캐리어 어그리게이션을 진행한다. 사용자는 분산된 대역폭을 사용할 때보다 캐리어 어그리게이션을 통해 1개의 대역폭으로 합쳐진 채널을 사용함으로써 통신 속도를 이용 대역폭에 비례해 향상할 수 있다.

캐리어 어그리게이션 과정을 통해 확장된 하나의 대역폭을 사용하여 통신을 시작한다. 이때, 본 논문에서 제안하고 있는 캐리어 어그리게이션은 WiFi 채널 본딩의 개념으로, 사용 가능한 채널 중 인접한 채널을 결합하여 사용 가능한 대역폭의 양을 늘려 처리량을 개선한다[27, 28, 29]. 송신 및 수신 효율성 향상을 위해 조각화된 채널을 하나로 묶어서 사용하게 된다. 다음 FIGURE 4은 캐리어 어그리게이션을 나타낸 것이다.

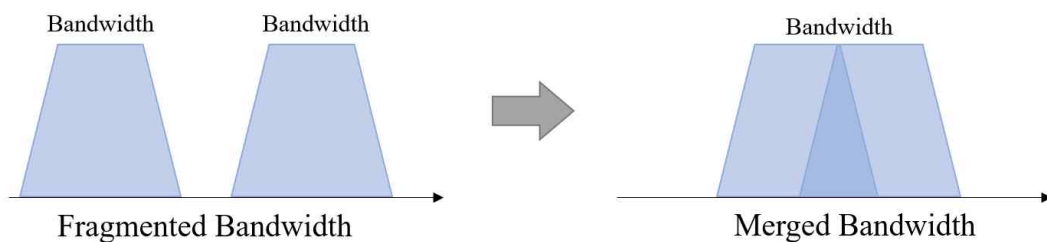


FIGURE 4. Carrier Aggregation of the Proposed Technique

단일화된 대역폭을 통해 통신을 시작한 후, 전송 중인 데이터의 오류 여부를 파악한다. 오류가 없는 경우 모든 데이터를 전송할 때까지 전송을 받

복한다. 채널의 간섭 변화로 인해 에러가 발생한 경우, 할당받은 채널을 통신에 사용할 수 없는 것으로 판단한다. 에러 발생으로 손실된 데이터의 재전송을 위해 채널 간섭을 감지하여 사용할 수 있는 채널을 탐색한다.

탐색을 통해 확인된 사용 가능한 채널은 동적 대역폭 할당과 캐리어 어그리게이션 과정을 다시 거치게 된다. 이때, 캐리어 어그리게이션된 채널은 재전송과 남은 데이터를 전송하는 데에 사용된다. 데이터 전송은 모든 데이터가 성공적으로 전송될 때까지 진행된다. 재전송 과정에서 에러가 발생하면 간섭 감지 및 동적 대역폭 할당의 과정을 다시 거치며 재할당된 채널은 캐리어 어그리게이션된다. 모든 데이터가 성공적으로 전송 완료되면 통신을 종료한다.

2. 간섭 인지 동적 대역폭 할당 전송 기법 이론적 분석

제안된 간섭 인지 동적 대역폭 할당 전송 기법의 채널 용량을 Shannon의 채널 용량 이론을 통해 이론적으로 확인하였다.

Shannon의 채널 용량 정리는 모든 채널이나 무선 및 광섬유 등의 매체를 통해 보낼 수 있는 정보의 최대량 또는 데이터 용량을 정의한다. Shannon의 정리는 제1 정리부터 제3 정리까지 있으며, 본 논문에서는 Shannon의 제3 정리를 통해 채널 용량을 계산하고자 하였다. 사용된 Shannon의 제3 정리의 수식은 다음과 같다.

$$C = B * \text{Log}_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (1)$$

수식(1)에서 C는 채널 용량으로, bit/s이다. B는 채널의 대역폭을 의미하며 Hz단위이다. $\frac{S}{N}$ 은 SNR(Signal-to-noise ratio)를 의미한다. 이때, 간섭은 고려되지 않는다. Shannon 채널 용량 정리를 통해 채널 대역폭이 클수록 데이터 전송 속도가 더 높다는 것을 확인할 수 있다.

비교를 위해 사용한 대역폭은 TABLE III과 같다.

TABLE III
Value of Set Bandwidth

Information	Set Value(MHz)
PS-LTE	20
802.11ah	26
TV White Space	30
Proposed Model	56

Shannon의 제3 정리 이론을 통한 비교는 재난안전통신망, TV White

Space, 802.11ah, 간섭 인지 동적 대역폭 할당 전송 기법을 기준으로 진행하였다.

다음 FIGURE 5는 Shannon의 제3 정리 이론의 채널 용량 공식에 따라 이론적으로 개선된 채널용량을 나타낸다. SNR을 5dB 간격으로 0dB부터 40dB까지 출력했으며, 단위는 Mbps로 변환하여 도출하였다.

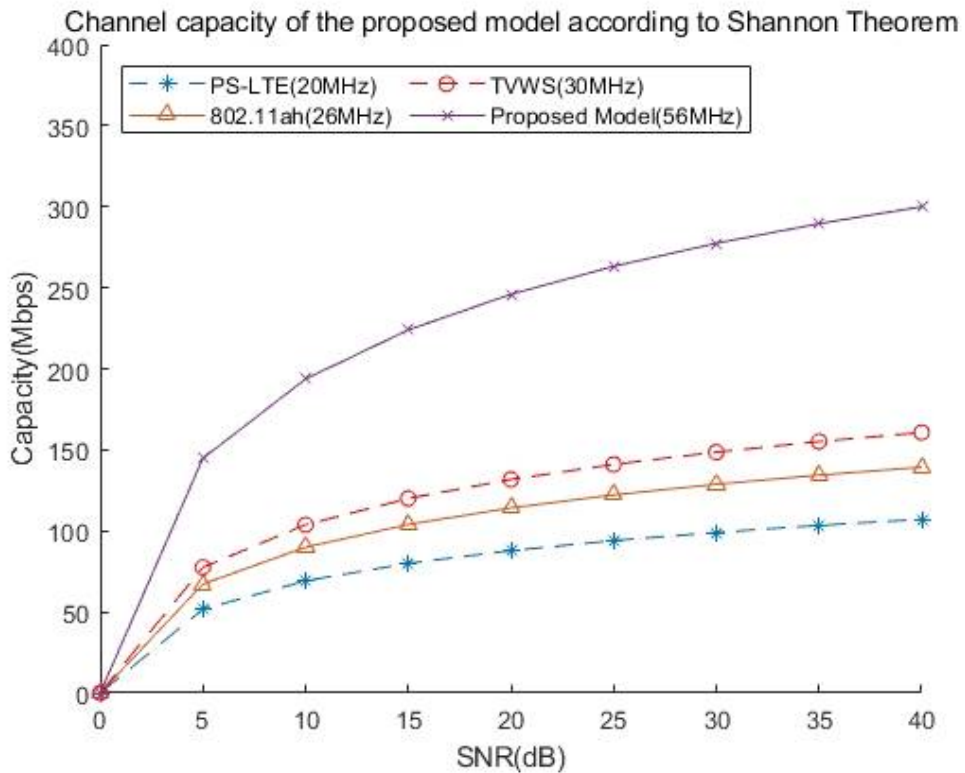


FIGURE 5. Channel capacity according to Shannon Theorem

SNR이 5dB일 때 재난안전통신망은 약 51.69Mbps이며 간섭 인지 동적 대역폭 할당 전송 기법은 약 144.75Mbps이다. SNR이 40dB일 때는 재난안전통신망은 약 110.47Mbps이며, 제안된 통신 기법은 약 309.31Mbps이다.

간접 인지 동적 대역폭 할당 전송 기법이 기존 방식보다 채널 용량이 약 2.8배 증가하는 것을 확인할 수 있다. 802.11ah 및 TV White Space도 기존 재난안전통신망보다 넓은 대역폭을 갖고 있으므로 SNR 40dB을 기준으로 802.11ah는 재난안전통신망보다 약 1.3배 높은 채널 용량을 제공하며 TV White Space의 경우 약 1.5배 높은 채널 용량을 제공하는 것을 확인할 수 있다.

이는 종래의 재난안전통신 방식보다 제안된 통신 방식이 더 넓은 대역폭을 사용함으로써 종래의 좁은 대역폭 문제를 해결할 수 있으며, 통신 환경의 성능 개선을 보일 수 있다는 것을 의미한다.

V. 성능 평가

1. 실험 환경

본 논문에서는 제안된 아이디어를 통해 개선되는 스루풋 및 레이턴시를 보여주는 것이 목적이므로, 시뮬레이션은 간단하게 구현하였다. 시뮬레이션은 Python으로 구축하였다. 패킷 전송 시뮬레이션은 로컬 환경에서 함수를 통해 송신 단과 수신 단으로 나누어 구성하였다. 동적 대역폭 할당 시뮬레이션은 함수를 통해 사용할 수 있는 채널을 무작위로 발생시킨 뒤, 송신 단에 할당하였다. 캐리어 어그리게이션은 간단한 구현을 위해 MCS 5에 따라 전송할 수 있는 데이터 사이즈에 맞추어 연산을 통해 대역폭을 합쳤다. 패킷 전송 시뮬레이션에서, 패킷 전송 에러 확률은 802.11ah의 PER 시뮬레이션을 통해 출력된 확률로 설정하였다.

성능 평가에서 종래의 재난안전통신망 환경을 구축하기 어려워 비교 대상에서 제외했다. 성능 평가는 802.11ah와 TV White Space를 결합하여 사용하는 간섭 인지 동적 대역폭 할당 전송 기법을 기준으로 진행된다. TV White Space의 PER을 계산할 수 없어 TV White Space는 802.11ah와 동일한 스펙을 갖지만 다른 주파수 대역에서 동작하는 통신 매체로 가정하였다. 모든 시뮬레이션에서 사용된 데이터 레이트 및 PER은 802.11ah의 MCS 5를 따른다.

다음 TABLE IV는 본 논문에서 시뮬레이션에서 사용한 802.11ah의 8MHz 및 16MHz를 가정한 MCS 5에 대해 정리한 것이다[30, 31].

TABLE IV
MCS Parameters

Information	Set Value
MCS	MCS 5
Modulation	64-QAM
Code Rate	2/3
8MHz Data Rate	23.4 Mbps
16MHz Data Rate	45.7 Mbps

본 실험에 사용된 802.11ah PER 확률은 매트랩에서 제공되는 802.11ah PER 시뮬레이션을 이용하였으며, FIGURE 6는 사용된 시뮬레이션의 흐름에 대해 재구성한 것이다[32]. 패킷을 전송하는 데 걸리는 시간은 각 MCS의 데이터 속도에 따라 다르므로 MCS가 높을수록 전송 정확도는 저하되지만[33], 데이터 전송률이 높아지고 총 처리량이 높아진다[34]. MCS가 너무 높으면 통신 가능한 범위가 제한적이므로[35, 36], 전송 정확도 및 처리량과 범위를 전체적으로 고려하여 시뮬레이션의 변조 코딩 구성을 MCS 5로 설정하였다.

시뮬레이션에 사용된 코드의 흐름은 다음과 같다. 각 SNR에 따라 패킷이 채널을 통해 전송 및 복조되고 PPDU(Physical Protocol Data Unit)가 복구된다. PSDU(Physical layer Service Data Unit)는 전송된 PSDU와 비교되어 패킷 오류 수와 그에 따른 패킷 오류율을 결정한다.

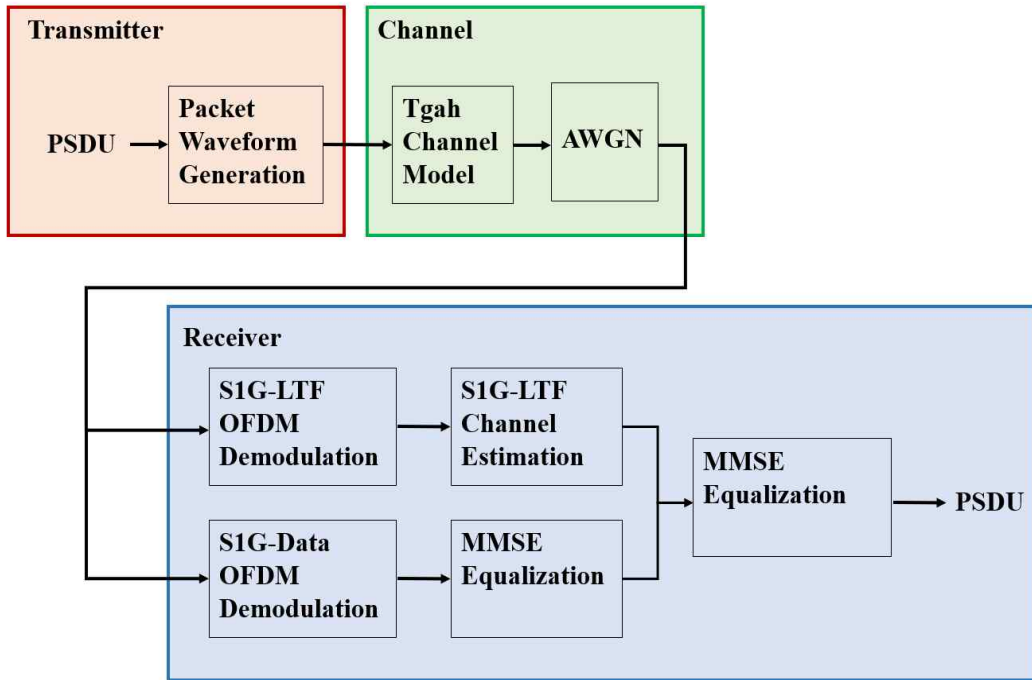


FIGURE 6. 802.11ah Packet Error Rate Simulation for 2x2 TGah Channel

FIGURE 7은 매트랩을 통해 출력된 8MHz의 PER을 나타낸다. 802.11ah PER 시뮬레이션에서는 짧은 프리앰블과 8MHz 및 16MHz의 채널과 MCS 5, 전송 데이터는 60,000byte를 가정했다. 시뮬레이션에서 출력된 PER을 전송 시뮬레이션에서 스루풋 및 레이턴시를 출력하기 위해 패킷 에러 확률로 사용하였다.

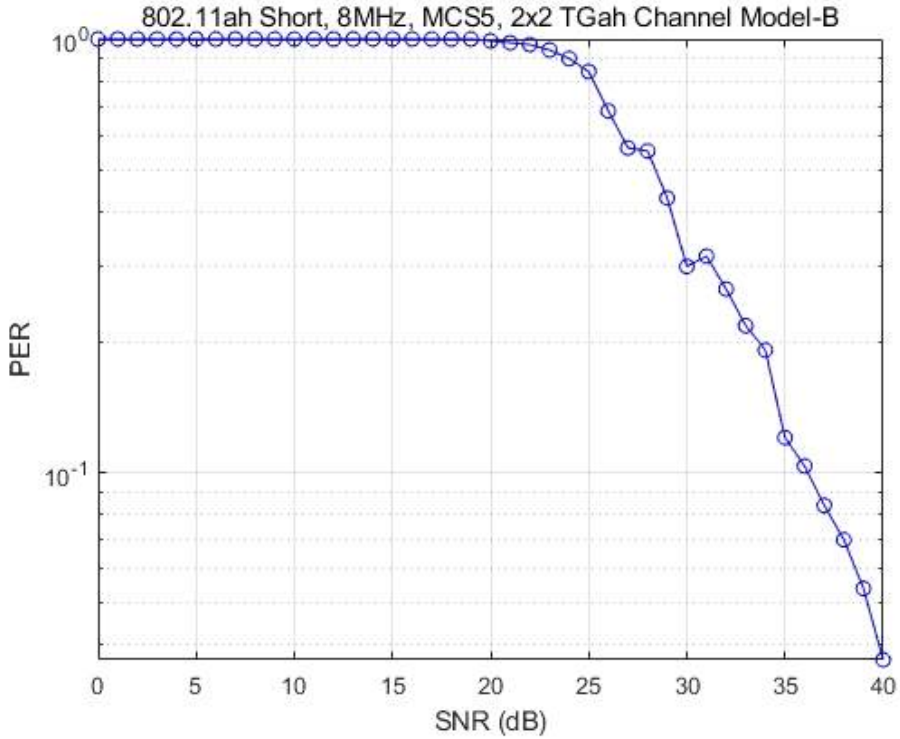


FIGURE 7. 802.11ah Packet Error Rate

본 논문의 시뮬레이션은 모빌리티의 이동성은 고려하지 않았기 때문에 사용자 및 송신기와 수신기의 위치와 신호의 세기가 고정되어 있다고 가정한다. 시뮬레이션에 적용된 간섭 레벨은 TABLE V로 가정하였다.

간섭 케이스가 1일 때, 간섭을 0dB-5dB까지 랜덤으로 발생시켰으며, 간섭 케이스가 2면 간섭을 5dB-10dB까지 랜덤으로 발생시켰다. 간섭 케이스가 3인 경우 간섭을 10dB-15dB 범위에서, 간섭 케이스가 4인 경우 15dB-20dB 범위 중 랜덤으로 발생시켰다. 간섭이 21dB 이상 발생하게 되면 PER이 1이상 되어 통신 에러가 발생하므로, 간섭이 21dB이상 발생하는 경우는 제외하고 시뮬레이션 하였다.

TABLE V
Value of the Interference Case

Interference Case	Set Value
1	0dB-5dB
2	5dB-10dB
3	10dB-15dB
4	15dB-20dB

평가 지표는 스루풋과 레이턴시를 사용했으며, 스루풋의 수식은 (2)와 같다.

$$Throughput = \frac{Successfully\ transmitted\ information\ bits}{Transmit\ time} \quad (2)$$

출력되는 스루풋의 단위는 Mbps다.

평가 지표로 사용된 레이턴시는 데이터 전송 시작부터 재전송을 포함하여, 데이터 전송이 완료된 시간을 의미한다. Ack은 Perfect Ack으로 가정한다.

2. 실험 결과 및 분석

시뮬레이션은 간섭 변화 횟수에 따라 레이턴시 및 스루풋을 출력하였다. 제안된 모델의 성능 비교를 위해 802.11ah는 16MHz 대역폭 1개의 채널을 할당하여 정적으로 동작시켰다. 제안된 모델은 802.11ah를 8MHz 대역폭의 6개 채널을 동적으로 할당하여 시뮬레이션을 진행하였다. 간섭 변화 횟수에 따른 시뮬레이션에서 사용된 파라미터는 TABLE VI와 같다.

TABLE VI
Simulation Parameters according to the Rate of Interference Change

Variable	Set Value
Number of Packets	1,000
Packet Size	60,000byte
Channel SINR	40dB
α	2, 4, 6, 8, 10, 12, 14
Interference Case	1, 2, 3, 4
Number of Iterations	50

전체 패킷의 수는 1,000개로 고정했으며, 패킷의 사이즈는 60,000byte로 가정하여 진행했다. 채널의 기본 SINR은 40dB이다. 시뮬레이션은 50번 반복하여 평균치를 출력했다.

본 연구의 시뮬레이션에서 α 는 패킷 전송 시뮬레이션 중 간섭이 변화하는 횟수를 의미한다. α 가 2인 경우 전체 패킷 수 1,000개를 전송하는 동안 설정된 간섭 케이스 범위에 따라 SINR이 랜덤으로 2번 변화한다. α 가 4

일 때, 전체 패킷 수 1,000개를 전송하는 동안 간섭 케이스에 따라 SINR이 랜덤으로 4번 변화하게 된다. α 의 값을 2부터 14까지 2의 간격으로 나누어 시뮬레이션을 진행하였다. 이때, 간섭 케이스를 1부터 4까지 나누어 각각의 성능을 평가했으며, 모든 패킷이 전송이 완료될 때까지 재전송을 시도했다.

FIGURE 8은 간섭 케이스1 일 때, 도출된 레이턴시를 출력한 것이다.

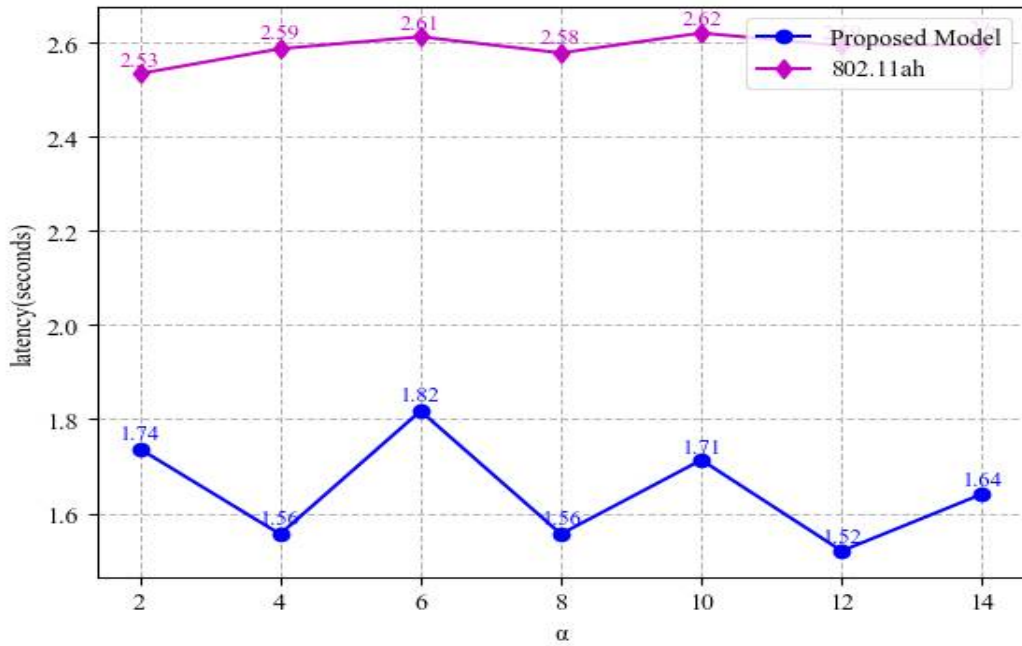


FIGURE 8. Latency of Interference Casel

FIGURE 9는 간섭 케이스가 2인 경우 도출되는 레이턴시를 나타내며, FIGURE 10은 간섭 케이스가 3일 때 출력된 레이턴시를 나타낸다.

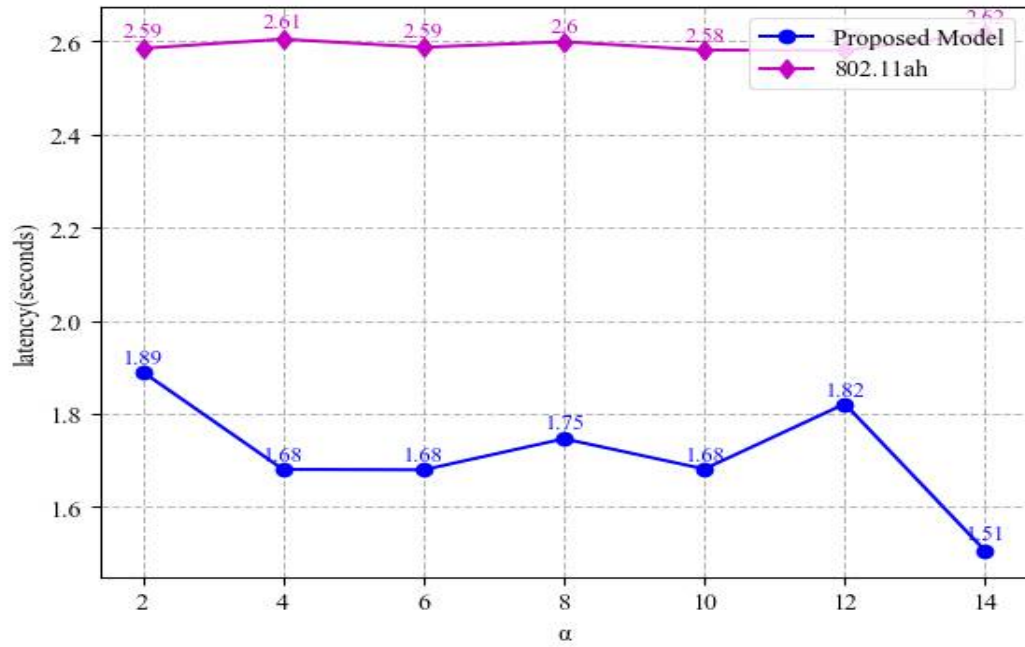


FIGURE 9. Latency of Interference Case2

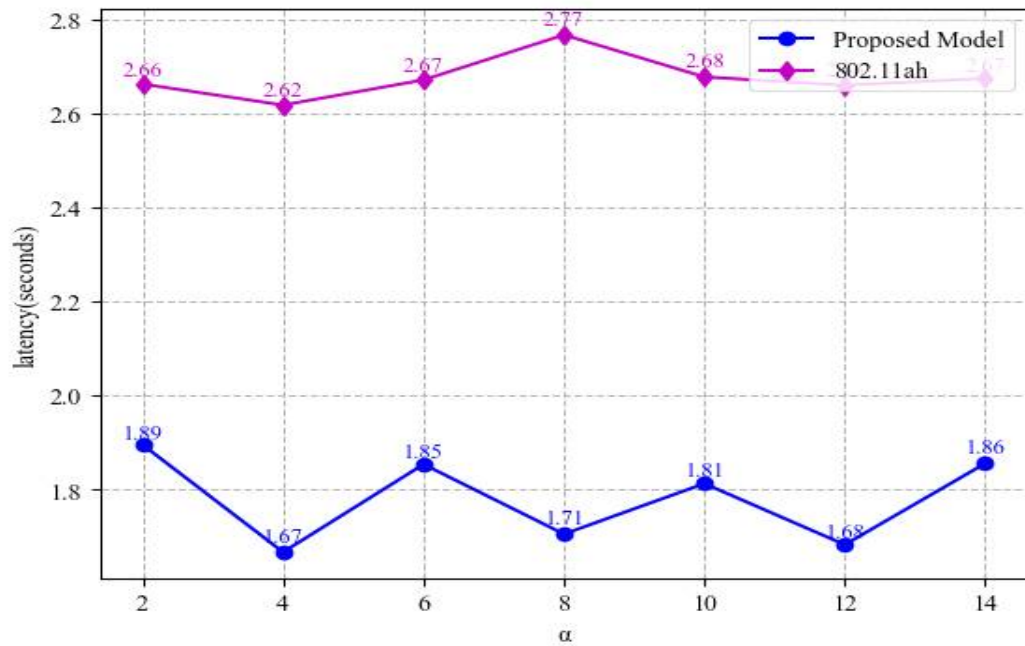


FIGURE 10. Latency of Interference Case3

FIGURE 11은 간섭이 4인 경우 도출된 레이턴시를 출력한 것이다.

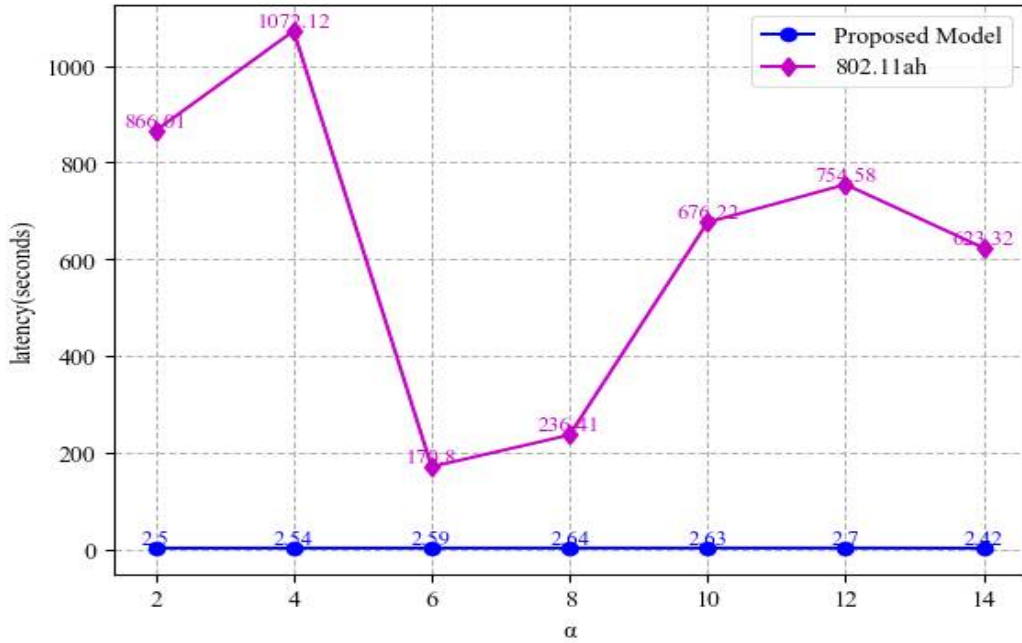


FIGURE 11. Latency of Interference Case4

FIGURE 8, 9, 10, 11을 통해 제안된 모델은 간섭이 무작위로 변화하더라도 802.11ah를 정적으로 사용했을 때보다 레이턴시가 더 낮은 것을 확인할 수 있다. FIGURE 11에서 α 가 2일 때 제안된 모델은 약 2.50초의 레이턴시를 출력했지만 802.11ah 정적 동작은 약 866.01초로 346.4배 증가한 레이턴시를 도출하는 것을 확인할 수 있다. α 가 14일 때 제안된 모델은 약 2.42초의 전송시간이 걸렸으며, 802.11ah는 약 623.32초로 약 257.5배 증가한 레이턴시를 출력하는 것을 확인할 수 있다. α 가 6인 지점에서 802.11ah와 제안된 모델의 레이턴시가 가장 적은 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 802.11ah의 SINR이 40dB에 가까워 PER에 따라 재전송이 발생하지 않은 경우이다. 이를 통해 제안된 모델이 802.11ah보다 항상 낮은 레이턴시를 유지하는 것을 알 수 있다.

해당 시뮬레이션에서는 1,000개의 패킷을 모두 전송할 때까지 재전송을 했으므로, 스루풋과 레이턴시 변화에 대한 차이가 없어 재전송을 제한하는 방식으로 스루풋을 확인해보고자 하였다.

스루풋을 확인하기 위해 시뮬레이션에서 재전송을 10회로 제한했으며, 재전송을 11회 이상 한 경우 실패한 패킷으로 분류하여 스루풋을 출력하였다. 레이턴시 및 스루풋은 α 의 변화에 따라 간섭의 경우를 1부터 4까지 나누어 출력하였다. FIGURE 12는 패킷 재전송 횟수를 10회로 제한하고 간섭 케이스가 1인 경우 출력된 레이턴시이다.

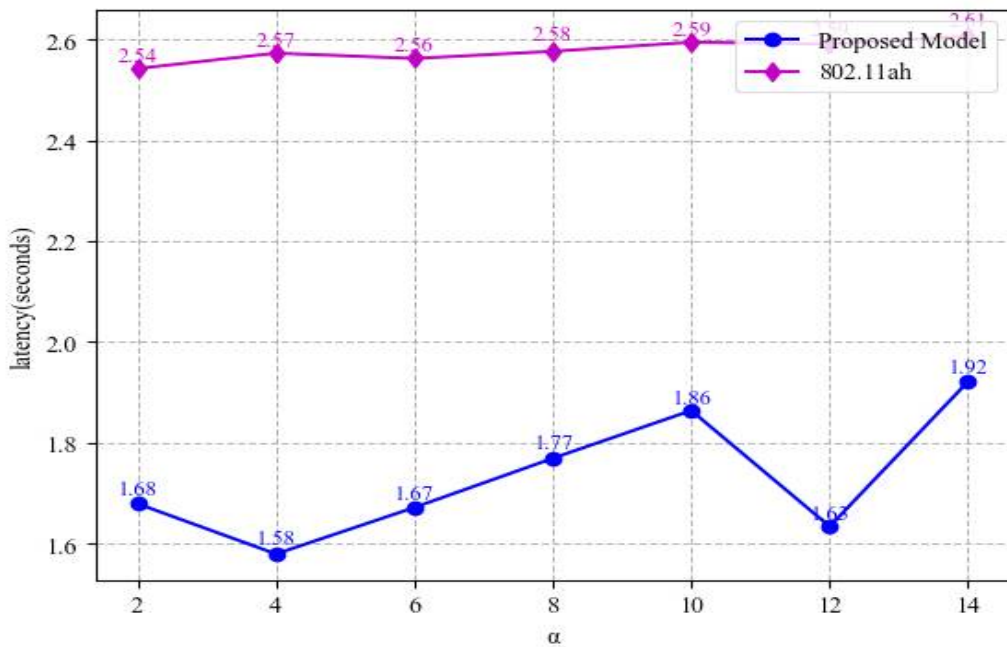


FIGURE 12. Latency of Interference Case1 in Transmit Limit

FIGURE 13은 패킷 재전송 횟수를 10회로 제한하고 간섭 케이스가 2인 경우 출력된 레이턴시이며, FIGURE 14는 동일한 조건으로 간섭 케이스를 3으로 변경했을 때 출력된 레이턴시이다.

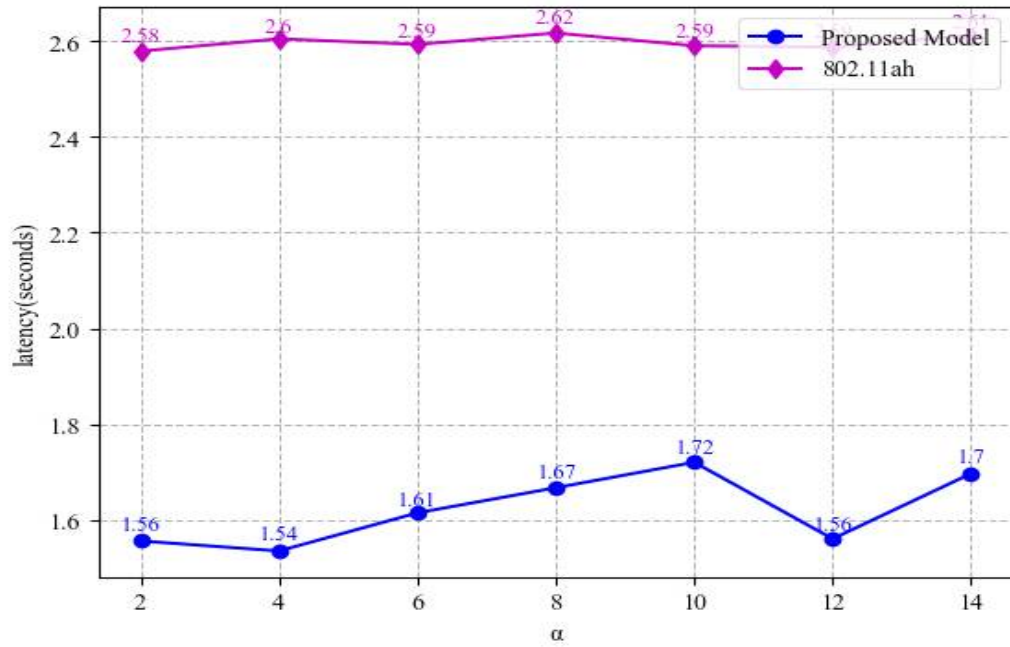


FIGURE 13. Latency of Interference Case2 in Transmit Limit

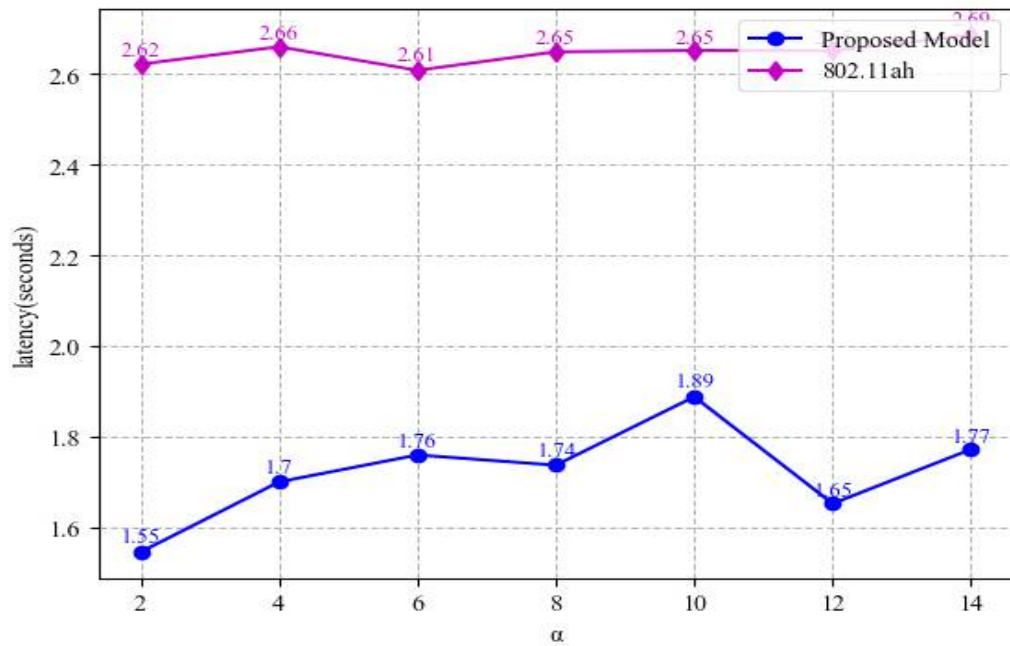


FIGURE 14. Latency of Interference Case3 in Transmit Limit

FIGURE 15는 재전송 제한 환경에서 간섭 케이스가 4일 때 출력된 레이턴시를 나타낸다.

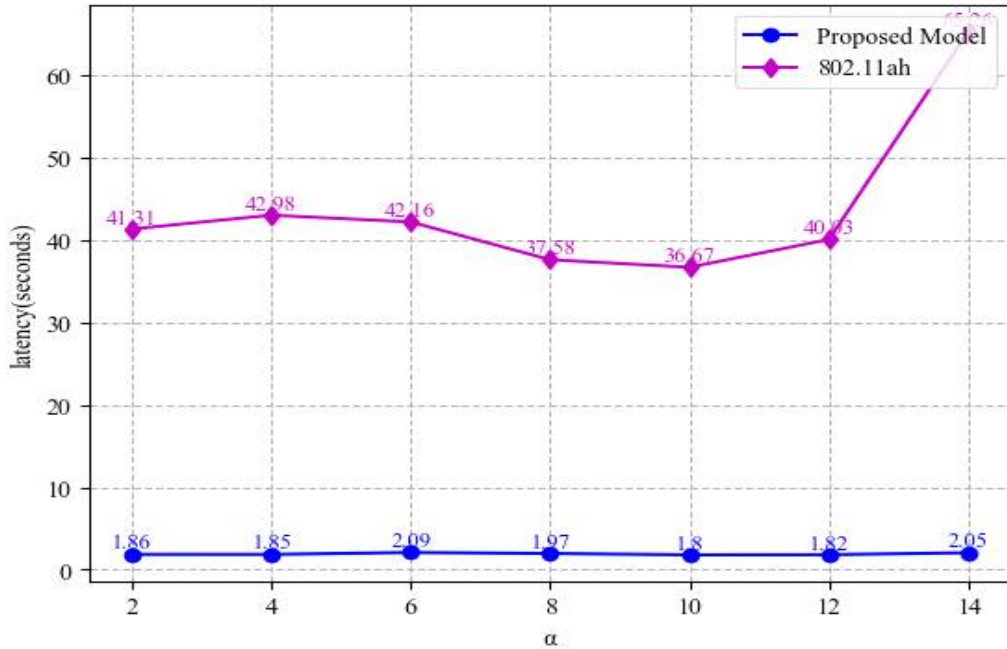


FIGURE 15. Latency of Interference Case4 in Transmit Limit

제시된 FIGURE 12, 13, 14, 15를 통해 재전송을 제한하더라도 제안된 모델의 레이턴시가 802.11ah를 정적으로 사용했을 때보다 레이턴시가 더 낮은 것을 확인할 수 있다. FIGURE 15를 기준으로 α 가 2인 지점에서 제안된 아이디어의 경우 패킷을 전송하는데 약 1.86초가 걸렸지만 802.11ah 정적 동작의 경우 약 41.31초로 약 22.2배의 레이턴시가 증가한 것을 확인할 수 있다. α 가 14일 경우 제안된 아이디어는 약 2.05초가 걸렸으며, 802.11ah는 약 65.26초의 레이턴시가 출력되어 약 31.8배 레이턴시가 증가하였다.

α 가 10인 지점에서 802.11ah는 가장 낮은 레이턴시를 보였지만 제안된 아이디어보다 약 20.3배 높은 레이턴시를 출력했다. 이를 통해 제안된 모델

이 재전송을 제한하거나 간섭이 무작위로 변하더라도 더 적은 레이턴시를 확보할 수 있음을 알 수 있다.

FIGURE 16, 17, 18, 19는 전송 제한에 따른 스루풋 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다. 이때, 전송 실패율은 802.11ah PER을 따른다. Python기반 전송 시뮬레이션의 구성 한계로 실제 전송에 걸리는 시간은 반영하지 못했다.

FIGURE 16은 간섭 케이스가 1일 때 전송 제한에 따른 스루풋을 출력한 것이다.

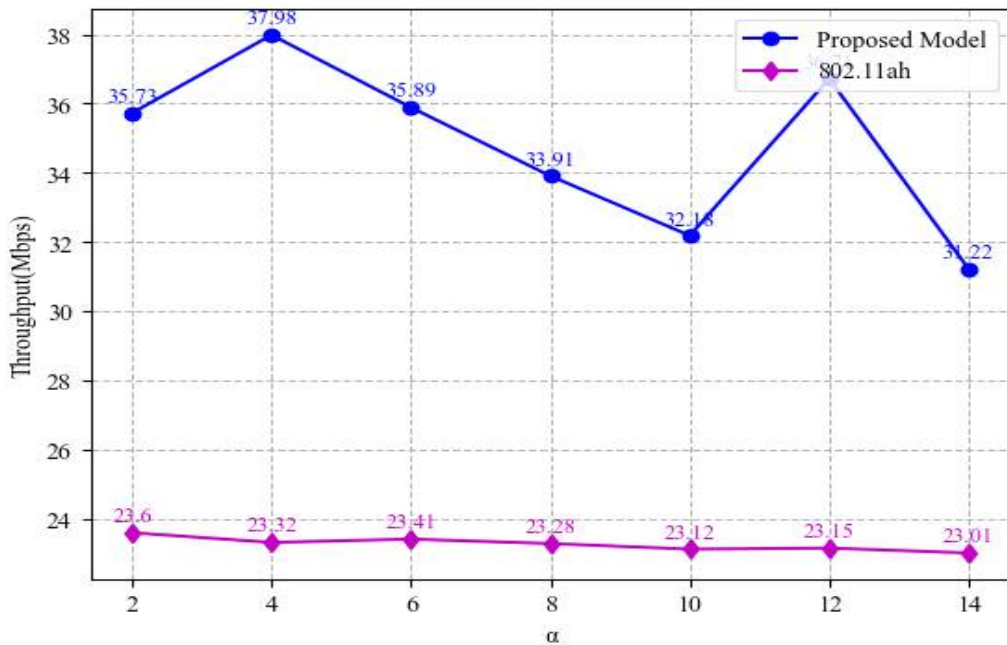


FIGURE 16. Throughput of Interference Case1 in Transmit Limit

다음 FIGURE 17은 간섭 케이스가 2인 경우이며, FIGURE 18은 간섭 케이스가 3일 때 전송 제한에 따른 스루풋을 출력한 것이다.

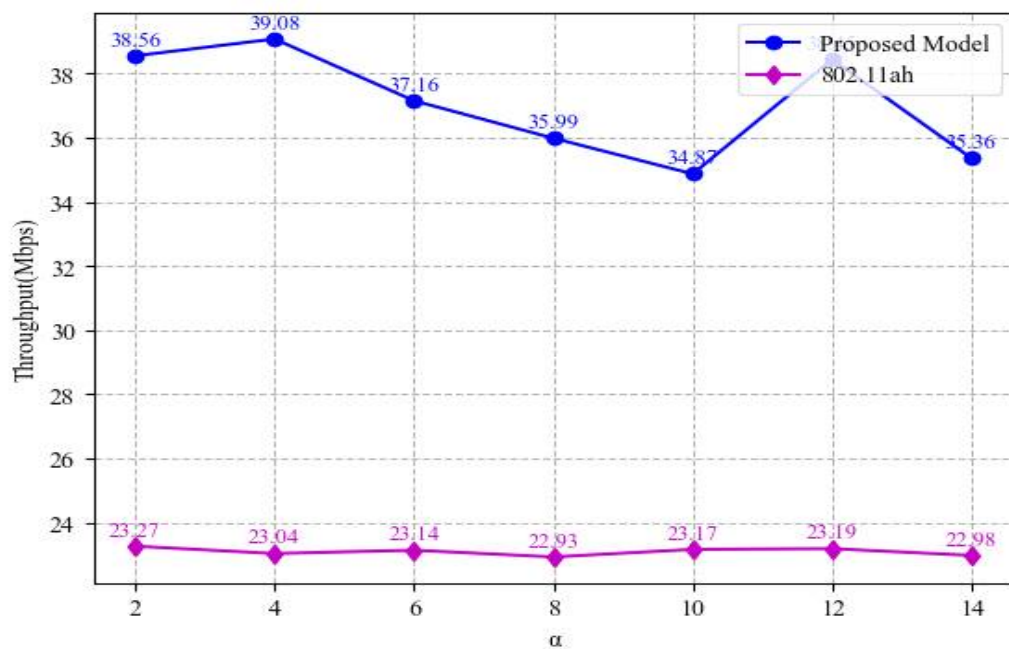


FIGURE 17. Throughput of Interference Case2 in Transmit Limit

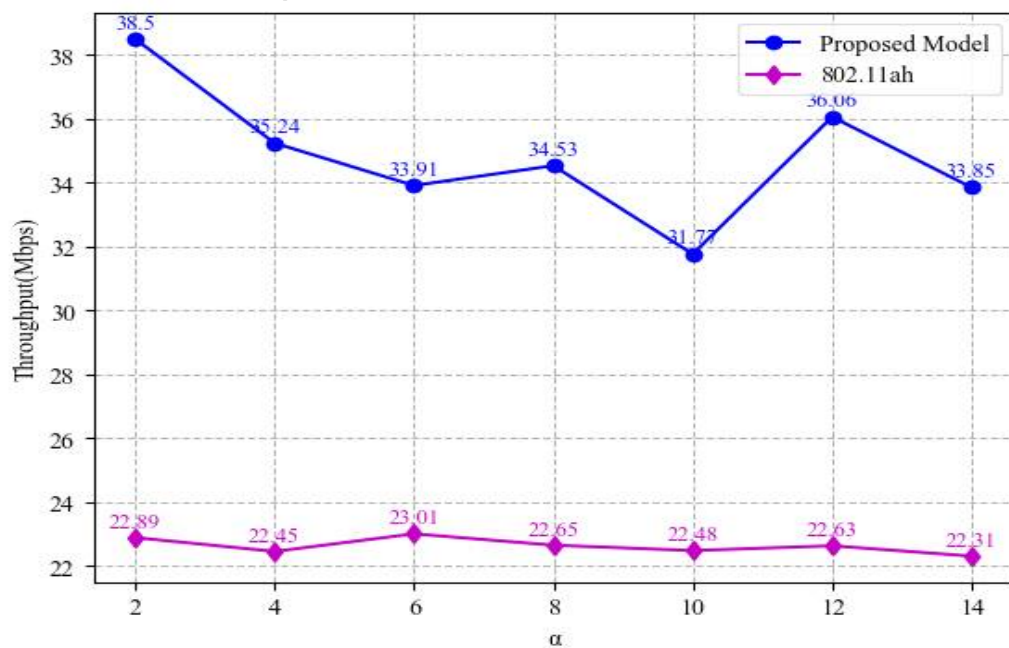


FIGURE 18. Throughput of Interference Case3 in Transmit Limit

FIGURE 19는 간섭 케이스가 4일 때 전송 제한에 따른 스루풋을 출력한 것이다.

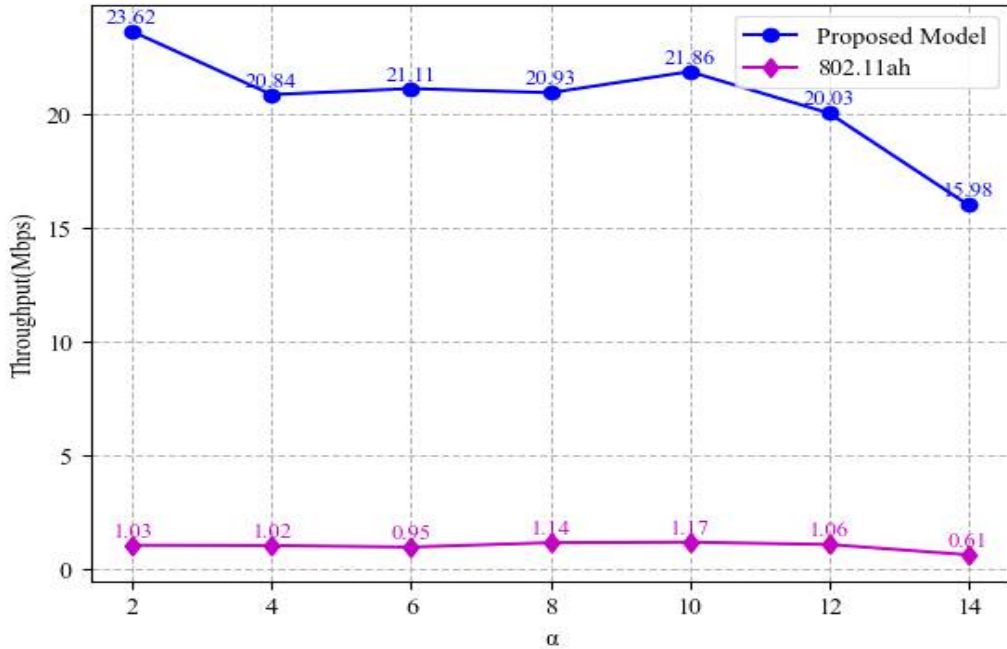


FIGURE 19. Throughput of Interference Case4 in Transmit Limit

FIGURE 16, 17, 18, 19를 통해 간섭이 랜덤으로 변화하는 환경에서 제안된 기법이 802.11ah 정적 동작보다 더 높은 스루풋을 제공하는 것을 확인하였다. FIGURE 19를 기준으로 제안된 아이디어는 α 값이 2일 때 약 23.62Mbps의 스루풋이 출력되었으며, 802.11ah는 약 1.03Mbps의 스루풋이 출력되었다. 제안된 아이디어의 스루풋이 802.11ah보다 약 22.9배 개선된 스루풋을 제공하는 것을 확인할 수 있다. α 값이 14인 경우 제안된 아이디어는 약 15.98Mbps를 출력했으며, 802.11ah는 약 0.61Mbps를 출력했으므로 약 26.1배 개선된 스루풋을 제공하였다.

이를 통해 제안된 간섭 인지 동적 대역폭 할당 전송 기법이 넓은 대역폭 사용과 간섭 인지를 통해 채널을 동적으로 할당함으로써 낮은 레이턴시와

높은 스루풋을 제공할 수 있다는 것을 확인했다.

이는 제안된 방식이 좁은 대역폭 및 네트워크 공존으로 인한 간섭 문제를 해결할 수 있다는 것을 의미하며, 종래의 재난안전통신망보다 일반 및 그룹 통화를 비롯해 사진 및 영상, UHD급 비디오와 같은 멀티미디어 전송에 더 적합한 방식임을 보였다. 제안된 기법은 데이터 전송 중 에러가 발생할 때마다 간섭 인지 및 대역폭 할당의 과정을 거치므로 종래의 방식보다 오버헤드 및 복잡도가 높을 수 있다는 단점이 있다. 그러나 무선 통신의 링크 적응 방식[37]과 같이 에러율을 통해 간섭 인지 및 대역폭 할당 과정을 조절하면 발생하는 오버헤드와 모델의 복잡도를 조절할 수 있을 것이다.

VI. 결론

재난안전통신망은 국가적 재난 상황 시 국민의 안전을 지키고 생명을 보호하기 위해 미션 크리티컬의 상황에서도 실시간 통신이 보장되어야 한다. 최근 영상 및 통신 서비스의 발달로 UHD급 화질의 영상 전송을 재난 대응에 사용하고자 하고 있어, 재난안전통신망을 이용한 고화질 영상의 전송은 미션 크리티컬의 상황에서 재난 대응을 위한 필수 요소로 자리 잡게 될 것이다. 종래의 재난안전통신망은 20MHz의 좁은 대역폭과 LTE-M, LTE-R과 같은 다른 종류의 네트워크 공존 문제가 있었지만, 스케줄링 방식으로 인해 간섭에 자유롭지 못했다.

따라서 본 논문에서는 802.11ah와 TV White Space의 대역폭을 동적으로 할당하여 간섭 인지 동적 대역폭 할당 전송 기법을 제안했다. 아이디어를 통해 802.11ah와 TV White Space Channel의 대역폭을 활용하여 종래의 재난안전통신망의 좁은 대역폭 문제와 LTE-R과 LTE-M과의 동일 주파수 내 네트워크 공존 문제를 해결했다. 더 나아가 LTE의 스케줄링 방식에서 벗어나 간섭 인지 및 동적 대역폭 할당을 통해 통신 중에 발생하는 간섭에 유동적으로 대응할 수 있도록 하였다.

시뮬레이션 결과를 통해 802.11ah의 정적 동작과 제안된 기법의 동적 동작을 레이턴시 및 스루풋을 출력하여 비교했다. 출력된 결과로 간섭이 무작위로 변화하면 정적으로 동작되는 802.11ah는 높은 레이턴시로 인해 스루풋이 낮아지는 것을 확인했으며, 제안된 아이디어는 낮은 레이턴시와 높은 스루풋이 출력되는 것을 확인하였다. 이를 통해 제안된 간섭 인지 동적 대역폭 할당 전송 기법이 간섭에 유동적으로 대응할 수 있음을 확인했다.

본 연구에서는 재난안전통신망 환경을 구현하지 못했으며, TV White Space의 PER을 적용하지 않고 시뮬레이션을 진행했다는 한계점이 있지만

향후 연구에서는 재난안전통신망 시뮬레이션 구성과 TV White Space의 PER을 반영하여 시뮬레이션에 적용하고자 한다. 더 나아가 시뮬레이션 변수를 노드 수, 노드 밀집도를 추가하여 개선되는 스루풋과 레이턴시를 출력해 본 논문의 시뮬레이션의 결과를 보완하고자 한다.

ACKNOWLEDGEMENTS

본 논문을 지도해주신 이일구 교수님과 제안 연구의 구체화를 위한 논의와 초기 시뮬레이션 평가 개발 및 관련 연구 분석에 기여해 준 심혜연 학생에게 감사드립니다.

참고문헌

- [1] I. Ahmad, W. Chen and K. Chang, "LTE-Railway User Priority-Based Cooperative Resource Allocation Schemes for Coexisting Public Safety and Railway Networks," in *IEEE Access*, vol. 5, 2017, pp. 7985-8000, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2698098.
- [2] S. Saafi, J. Hosek and A. Kolackova, "Cellular-enabled Wearables in Public Safety Networks: State of the Art and Performance Evaluation," 2020 12th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), 2020, pp. 201-207, doi: 10.1109/ICUMT51630.2020.9222459.
- [3] Kaleem, Z., Khan, A., Hassan, S.A. et al. "Full-Duplex Enabled Time-Efficient Device Discovery for Public Safety Communications," *Mobile Netw Appl* 25, pp. 341 - 349, 2020, doi: 10.1007/s11036-019-01289-5
- [4] Daegeon Kim, Do Hyung Gu, Huy Kang Kim, "Beyond PS-LTE: Security Model Design Framework for PPDR Operational Environment", *Security and Communication Networks*, vol. 2020, 2020, <https://doi.org/10.1155/2020/8869418>
- [5] J. Oueis, V. Conan, D. Lavaux, R. Stanica and F. Valois, "Overview of LTE Isolated E-UTRAN Operation for Public Safety," in *IEEE Communications Standards Magazine*, vol. 1, no. 2, 2017, pp. 98-105, doi: 10.1109/MCOMSTD.2017.1600875.
- [6] Lee, Jae-Jeong, Pyung-Koo Park, Byung-Chang Chung, Sang-Wan Kim, Ki-Dong Nam, and Woo-Seop Rhee. "Call Model and Test-Verification"

- on Methods for PS-LTE Core Equipment" *Electronics* 10, no. 20: 2513. 2021, <https://doi.org/10.3390/electronics10202513>
- [7] Jarwan, A., Sabbah, A., Ibnkahla, M., & Issa, O. "LTE-based Public Safety Networks: A Survey." *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2019, doi:10.1109/comst.2019.2895658
- [8] Kaleem, Z., Yousaf, M., Qamar, A., Ahmad, A., Duong, T. Q., Choi, W., & Jamalipour, A. "UAV-Empowered Disaster-Resilient Edge Architecture for Delay-Sensitive Communication." *IEEE Network*, 2019, pp. 1 - 9. doi:10.1109/mnet.2019.1800431
- [9] Z. Kaleem, M. H. Rehmani, M. A. Imran, M. Z. Shakir, A. Jamalipour and E. Ahmed, "IEEE Access Special Section Editorial: Mission Critical Public-Safety Communications: Architectures, Enabling Technologies, and Future Applications," in *IEEE Access*, vol. 6, 2018, pp. 79258-79262, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2885257.
- [10] Bembe, M., Abu-Mahfouz, A., Masonta, M. et al. A survey on low-power wide area networks for IoT applications. *Telecommun Syst* 71, 2019, pp. 249 - 274, <https://doi.org/10.1007/s11235-019-00557-9>
- [11] Ayman Mukaddam, "802.11 Alternate PHYs", *Certified Wireless Network Professional*, 2018, <https://www.cwnp.com/uploads/802-11alternatephyswhitepaper.pdf>
- [12] I. Ahmad and K. Chang, "Mission Critical User Priority-Based Random Access Scheme for Collision Resolution in Coexisting PS-LTE and LTE-M Networks," in *IEEE Access*, vol. 7, 2019, pp. 115505-115517, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2934778.
- [13] Saafi, Salwa, Jiri Hosek, and Aneta Kolackova. "Enabling Next-Genera

- tion Public Safety Operations with Mission-Critical Networks and Wearable Applications" *Sensors* 21, no. 17: 5790. 2021, <https://doi.org/10.3390/s21175790>
- [14] A. R. Ansari and S. Cho, "CHESS-PC: Cluster-Head Selection Scheme With Power Control for Public Safety Networks," in *IEEE Access*, vol. 6, 2018, pp. 51640–51646, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2869917.
- [15] D. Sikeridis, E. E. Tsiropoulou, M. Devetsikiotis and S. Papavassiliou, "Socio-spatial Resource Management in Wireless Powered Public Safety Networks," *MILCOM 2018 - 2018 IEEE Military Communications Conference (MILCOM)*, 2018, pp. 810–815, doi: 10.1109/MILCOM.2018.8599752.
- [16] Mahbubur Rahman, Abusayeed Saifullah, "A comprehensive survey on networking over TV white spaces," *Pervasive and Mobile Computing*, Volume 59, 101072, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.pmcj.2019.101072>.
- [17] Sadip Midya, Asmita Roy, Koushik Majumder, Santanu Phadikar, "QoS aware distributed dynamic channel allocation for V2V communication in TVWS spectrum," *Computer Networks*, Volume 171, 107126, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2020.107126>.
- [18] W. Zhang, G. Zhang, Y. Zheng, L. Yang and C. K. Yeo, "Spectrum Sharing for Heterogeneous Networks and Application Systems in TV White Spaces," in *IEEE Access*, vol. 6, 2018, pp. 19833–19843, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2824836.
- [19] M. Z. Islam, J. F. O'Hara, D. Shadoan, M. Ibrahim and S. Ekin, "TV White Space Based Wireless Broadband Internet Connectivity: A Case Study With Implementation Details and Performance Analysis," in *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 2, 2021, pp. 2449–246

- 2, doi: 10.1109/OJCOMS.2021.3123939.
- [20] Q. T. Ngo, D. N. Minh Dang, Q. Le-Trung and D. K. Lam, "A Novel Directional MAC in Restricted Access Window for IEEE 802.11ah Networks," 2019 26th International Conference on Telecommunications (ICT), 2019, pp. 167-171, doi: 10.1109/ICT.2019.8798775.
- [21] Pavan, B.S., Harigovindan, V.P. "A Novel RAW Slot Allocation Scheme for Improving the Performance of IEEE 802.11ah Multi-rate IoT Networks." *Advances in Communication, Devices and Networking*, vol 902. 2022, pp. 593-601, https://doi.org/10.1007/978-981-19-2004-2_54
- [22] S. KHAN and M. ZEESHAN, "Performance and Throughput Analysis of IEEE 802.11ah for Multiband Multimode Operation," 2018 21st International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC), 2018, pp. 150-155, doi: 10.1109/WPMC.2018.8712956.
- [23] Šljivo A, Kerkhove D, Tian L, Famaey J, Munteanu A, Moerman I, Hoebeke J, De Poorter E. Performance Evaluation of IEEE 802.11ah Networks With High-Throughput Bidirectional Traffic. *Sensors*. 18(2):325. 2018, <https://doi.org/10.3390/s18020325>
- [24] Abed, N.H., AL-Dujaili, M.J. & Abbas, S.A., "Proposed an efficient multilevel dynamic bandwidth allocation (M-DBA) scheme for FiWi networks," *Opt Quant Electron* 54, 615, 2022, <https://doi.org/10.1007/s11082-022-03947-7>
- [25] C. M. Assi, Yinghua Ye, Sudhir Dixit and M. A. Ali, "Dynamic bandwidth allocation for quality-of-service over Ethernet PONs," in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 21, no. 9, 2003, pp. 1467-1477, doi: 10.1109/JSAC.2003.818837.

- [26] M. P. McGarry, M. Reisslein and M. Maier, "Ethernet passive optical network architectures and dynamic bandwidth allocation algorithms," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 10, no. 3, 2008, pp. 46–60, doi: 10.1109/COMST.2008.4625804.
- [27] S. Barrachina-Muñoz, B. Bellalta and E. W. Knightly, "Wi-Fi Channel Bonding: An All-Channel System and Experimental Study From Urban Hotspots to a Sold-Out Stadium," in *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 29, no. 5, 2021, pp. 2101–2114, doi: 10.1109/TNET.2021.3077770.
- [28] M. Harta Dwijaksara, W. Sook Jeon, and D. Geun Jeong, "A centralized channelization scheme for wireless LANs exploiting channel bonding," In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Symposium on Applied Computing (SAC '18)*, Association for Computing Machinery, 2018, pp. 2092 – 2101. <https://doi.org/10.1145/3167132.3167357>
- [29] S. Barrachina-Muñoz, A. Chiumento and B. Bellalta, "Multi-Armed Bandits for Spectrum Allocation in Multi-Agent Channel Bonding WLANs," in *IEEE Access*, vol. 9, 2021, pp. 133472–133490, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3114430.
- [30] M. Qutab-ud-din, A. Hazmi, B. Badihi, A. Larmo, J. Torsner and M. Valkama, "Performance analysis of IoT-enabling IEEE 802.11ah technology and its RAW mechanism with non-cross slot boundary holding schemes," *2015 IEEE 16th International Symposium on A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM)*, 2015, pp. 1–6, doi: 10.1109/WoWMoM.2015.7158204.
- [31] Le Tian, Serena Santi, Amina Seferagić, Julong Lan, Jeroen Famaey, "

- Wi-Fi HaLow for the Internet of Things: An up-to-date survey on IEEE 802.11ah research," *Journal of Network and Computer Applications*, Volume 182, 103036, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2021.103036>.
- [32] The Math Works, Inc. MATLAB. Version R2022b, 802.11ah Packet Error Rate Simulation for 2x2 TGah Channel, <https://kr.mathworks.com/help/wlan/ug/802-11ah-packet-error-rate-simulation-for-2x2-tgah-channel.html#d124e7884>
- [33] Sagheer Khan, Muhammad Zeeshan, Yasar Ayaz, "Implementation and analysis of MultiCode MultiCarrier Code Division Multiple Access (MC - MC CDMA) in IEEE 802.11ah for UAV Swarm communication," *Physical Communication*, Volume 42, 101159, 2020, doi: [10.1016/j.phycom.2020.101159](https://doi.org/10.1016/j.phycom.2020.101159).
- [34] M. Mahesh and V. P. Harigovindan, "Throughput Enhancement of IEEE 802.11ah RAW Mechanism using ANN," 2020 First IEEE International Conference on Measurement, Instrumentation, Control and Automation (ICMICA), 2020, pp. 1-4, doi: [10.1109/ICMICA48462.2020.9242760](https://doi.org/10.1109/ICMICA48462.2020.9242760).
- [35] T. Wulandari, D. Perdana, and R. M. Negara, "Node Density Performance Analysis on IEEE 802.11ah Standard for VoIP Service", *Int. j. commun. netw. inf. secur.*, vol. 10, no. 1, 2022, DOI:<https://doi.org/10.17762/ijcnis.v10i1.3023>.
- [36] Šljivo A, Kerkhove D, Tian L, Famaey J, Munteanu A, Moerman I, Hoebeke J, De Poorter E., "Performance Evaluation of IEEE 802.11ah Networks With High-Throughput Bidirectional Traffic," *Sensors*, 18(2):325, 2018, doi: [10.3390/s18020325](https://doi.org/10.3390/s18020325)
- [37] C. Yu, L. Yu, Y. Wu, Y. He and Q. Lu, "Uplink Scheduling and Link

Adaptation for Narrowband Internet of Things Systems," in IEEE Access, vol. 5, 2017, pp. 1724-1734, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2664418.

ABSTRACT

Interference Aware Dynamic Bandwidth Allocation Transmission Scheme for Public Safety-LTE

Tae Rim Park
Department of Future
Convergence Technology
Engineering
Graduate School of
Sungshin Women's University

In order to protect people's lives and property from recent terrorist threats and national disasters, the government is building a disaster safety communication network. A disaster safety communication network is essential for quick and safe rescue activities in a disaster situation. However, since the conventional disaster safety communication network allocates a narrow bandwidth of 20MHz in total, it cannot provide high-speed transmission communication services such as UHD video and real-time communication. In addition, since it uses the same frequency band as LTE-R or LTE-M, there is an interference problem. Disaster safety communication network is capable of long-distance transmission due to the characteristics of a low frequency band, so there is a problem of performance degradation due to intentional radio interference attacks such as jamming or unintentional interference due to a large number of users.

In this paper, we propose an interference-aware dynamic bandwidth allocation scheme that simultaneously uses 802.11ah and TV White Space to solve the conventional problem. The idea proposed in this paper

provides users with available channel bandwidth through dynamic bandwidth allocation by detecting interference. Performance can be improved in proportion to the increase in bandwidth by transmitting data with high efficiency using a carrier aggregation technique on a channel allocated by the dynamic bandwidth allocation method. The idea proposed in this paper is demonstrated through simulation after showing improved channel capacity through the Shannon Theorem.