

## 무선통신 채널 용량 향상을 위한 NOMA-TFIM 기법연구

김 재 오\*, 헨드라닝랏 데니 쿠스마\*, 나로타마 바스카라\*\*, 신 수 용<sup>o</sup>

## A Study of NOMA-TFIM for Improving Channel Capacity

Jae Oh Kim\*, Denny Kusuma Hendraningrat\*, Bhaskara Narottama\*\*, Soo Young Shin<sup>o</sup>

## 요 약

비-직교 다중접속 (NOMA : Non-orthogonal Multiple Access)은 기존의 직교 다중접속 (OMA : Orthogonal Multiple Access) 기법과 달리 송신단에서 채널 이득에 따른 서로 다른 전력 할당을 통해 사용자의 신호를 동시에 전송하여 채널 용량을 향상한 기법이다. 인덱스 변조 (IM : Index Modulation)는 NOMA 방식과 달리 안테나 정보나 부반송파, 시간 슬롯 등의 자원을 사용하여 주파수 효율을 증가시킨다. 본 논문에서는 채널 용량 향상을 위해 NOMA와 IM을 결합시킨 NOMA-IM 기법 중 시간 및 주파수 인덱스 변조 (TFIM : Time-Frequency Index Modulation)를 NOMA와 결합한 새로운 기법을 제안한다. 제안하는 기법의 성능평가를 위해 OMA, NOMA, NOMA-TIM (Time Index Modulation), NOMA-FIM (Frequency Index Modulation)과 비교한다. 이를 통하여 NOMA-TFIM의 성능 우수성을 입증한다.

**Key Words** : Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA), Index Modulation (IM), Time-Frequency Index Modulation (TFIM), Channel Capacity

## ABSTRACT

Non-orthogonal Multiple Access (NOMA) is different from the conventional Orthogonal Multiple Access (OMA) technique, by simultaneously transmitting user signals through different power allocations according to channel gain. It is a technique that improves capacity. Unlike the NOMA method, Index Modulation (IM) increases frequency efficiency by using resources such as antenna information, subcarriers, and time slots. In this paper, we propose a new technique that combines Time-Frequency Index Modulation (TFIM) with NOMA among NOMA-IM techniques that combine NOMA and IM to improve channel capacity. In this paper, theoretical analysis and simulation of the channel capacity of NOMA-TFIM are conducted that compares with existing OMA, NOMA, NOMA-TIM (Time Index Modulation), and NOMA-FIM (Frequency Index Modulation). It demonstrates the performance gain of NOMA-TFIM.

\* 이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2019R1A2C1089542).

• First Author : Kumoh National Institute of Technology, kumoh\_jaeoh@kumoh.ac.kr, 정회원

<sup>o</sup> Corresponding Author : Kumoh National Institute of Technology, wdragon@kumoh.ac.kr, 중신회원

\* National Standardization Agency of Indonesia, dennykusumah@gmail.com

\*\* Kumoh National Institute of Technology, bhaskara@kumoh.ac.kr, 학생회원

논문번호 : 202101-021-A-RN, Received January 22, 2021; Revised April 6, 2021; Accepted April 8, 2021

## I. 서 론

최근 모바일 사용자의 증가와 5G 사용량의 증가로 인해 데이터 트래픽이 급격히 증가하고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위한 기술들 가운데 한정된 주파수에서 주파수 효율을 높인 비-직교 다중접속 (NOMA : Non-Orthogonal Multiple Access)과 인덱스 변조 (IM : Index Modulation) 기법이 활발히 연구되고 있다.<sup>[1,2]</sup>

NOMA는 송신단에서 채널 이득에 따른 서로 다른 전력 할당을 통해 사용자의 신호를 동시에 전송하는 중첩 코딩을 사용한다. 수신단에서는 순차적 간섭 제거 (SIC : Successive Interference Cancellation)를 사용하여 복호한다. 이러한 원리를 기반으로 NOMA는 동일한 주파수 조건에서 기존의 직교 다중접속 (OMA : Orthogonal Multiple Access)보다 높은 주파수 효율을 가진다.<sup>[3]</sup>

IM은 NOMA 방식과 다르게 안테나 정보나 주파수, 시간 슬롯 등의 자원을 사용하여 주파수 효율 증가를 기대할 수 있다.<sup>[4]</sup> 안테나 정보를 활용한 대표적인 기법으로는 공간변조 (SM : Spatial Modulation)가 있으며 다중 전송 안테나를 사용하여 안테나의 색인을 사용하여 정보를 전달한다. 수신단에서는 받은 송신안테나의 색인 정보를 알아내어 정보전달 비트수를 늘릴 수 있다. 하지만 SM은 정보 비트수를 늘리기 위해서 송신안테나 수를 늘려야 함으로 SISO (Single-Input Single- Output) 환경에서는 SM을 사용할 수 없다.<sup>[5]</sup> 반면, 주파수 자원과 시간 자원을 활용하면 안테나 수를 늘리지 않아도 정보 비트수를 늘릴 수 있다. 주파수 자원을 이용한 FIM (Frequency Index Modulation)은 사용하는 부반송파의 색인 정보를 이용하여 주파수 효율을 늘릴 수 있으며,<sup>[6]</sup> 시간 자원을 이용한 TIM (Time Index Modulation)은 시간 슬롯을 이용하여 전송받은 시간의 색인 정보를 이용하여 정보 비트수를 늘릴 수 있다.<sup>[7]</sup> 본 논문에서 사용하는 기법은 안테나 정보를 제외한 주파수와 시간 슬롯을 함께 사용하는 TFIM (Time-Frequency Index Modulation) 기법을 사용함으로써 정보 비트수를 늘려 기존의 FIM과 TIM 보다 더 높은 채널 용량 향상을 기대한다.

기존 NOMA의 성능 향상을 위한 기법들 중 NOMA와 IM을 결합한 연구로는 다중 입력 안테나에서 공간 변조를 사용한 NOMA-SSK (Space Shift Keying)와 NOMA-GSSK (Generalized Space Shift Keying)<sup>[8]</sup>, NOMA의 OFDM 신호를 Subblock으로

나눈 뒤 부반송파 인덱스를 이용한 OFDM-IM NOMA (Orthogonal frequency-division multiplexing-IM NOMA)<sup>[9]</sup>, 협력 NOMA 전송방식에서 NOMA의 OFDM 신호의 부반송파 인덱스를 이용한 CIM-OFDM NOMA<sup>[10]</sup>, 제안하는 기법과 기존 NOMA-IM 기법을 비교하면 NOMA-SSK와 NOMA-GSSK의 경우 정보 비트를 늘리기 위해 송신 안테나 수를 늘려야 한다는 한계를 가지고 있으며 OFDM-IM NOMA와 CIM-OFDM NOMA는 NOMA의 OFDM 신호의 부반송파 인덱스를 이용하는 공통점을 가지고 있고 본 연구에는 NOMA 자체의 OFDM 인덱스를 사용하지 않는다는 차이점을 가지고 있다.

제안하는 TFIM은 시간과 주파수 자원을 가지는 하나의 자원 블록 (RB : Resource Block)에 시간 슬롯 1개당 7개의 심볼과 하나의 대역폭당 12개의 부반송파를 포함하여 총 84개의 자원요소 (RE : Resource Element)들을 가진다. 제안하는 시스템에서는 하나의 RE가 비활성화되어 인덱스로 활용된다.

본 논문에서 제안하는 NOMA-TFIM은 NOMA에 TFIM을 결합한 기법으로 하향링크에서 3명의 사용자가 정보를 받는 상황을 가정하였고 SISO 환경을 고려하였다. 비교할 기존 모델로는 IM 기법을 사용하지 않은 OMA, NOMA와 NOMA에서 IM 기법을 결합한 NOMA-FIM, NOMA-TIM을 비교한다.

본 논문에서 제안하는 NOMA-TFIM은 한정된 자원인 주파수와 시간을 부반송파와 시간슬롯 인덱스를 이용하여 동시에 사용함으로써 기존의 방식보다 향상된 채널 용량을 얻을 수 있을 것이라 기대한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 시스템 모델과 NOMA-TFIM의 매핑 테이블을 소개한다. 3장에서는 NOMA-TFIM의 용량분석을 기술한다. 그리고 4장에서는 모의실험을 통해 제안된 기법과 기존의 기법들의 성능을 비교하고 마지막으로 5장에서 결론을 기술한다.

## II. 시스템 모델

제안하는 시스템 모델은 그림 1과 같이 단일 셀 하향링크 SISO 모델로 각 사용자는  $U_i$  ( $i \in 1, 2, 3$ )로써 표현되며  $i$ 는 각 사용자의 노드를 의미한다. 기지국에 가까운 사용자는  $U_1$ , 기지국에서 가까운 사용자와 가장 먼 사용자 사이의 중간 사용자는  $U_2$ 로 표현하였으며 기지국에서 가장 먼 사용자는  $U_3$ 로 나타낸

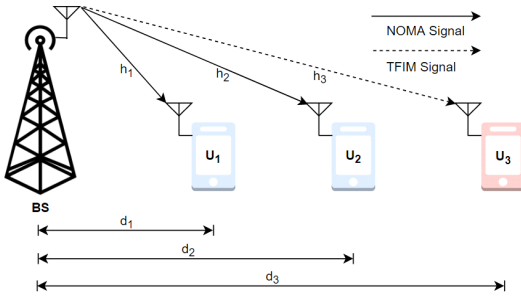


그림 1. 제안하는 시스템 모델  
Fig. 1. Proposed System Model

다. 각 사용자들은 기지국의 최대 셀 반경 안에서 각 떨어져 있으며 기지국에서 가까운 사용자 2명은 NOMA 또는 OMA를 사용하고 기지국에서 가장 먼 사용자는 앞에 사용자가 NOMA를 사용하였을 경우 IM 또는 NOMA를 사용하고 앞에 사용자가 OMA를 사용하였으면 OMA 사용을 가정한다. IM 사용자의 경우 이상적인 채널 환경 상황에서 RB의 시간 슬롯과 부반송파의 인덱스 신호를 통해 계산 되는 최대 정보 비트수만을 받게된다. 본 논문에서는 NOMA 사용자 2명과 TFIM 사용자를 고려하였으므로 그림 1과 같이 나타내었다. 기지국에서의 전력은  $P=1$ 이며 각 NOMA 사용자별로 채널 환경에 따른 전력을 할당해서 받게 된다. 각 사용자는  $P_i = \psi_i P$  ( $i \in 1, 2$ )의 전력을 가지며  $\psi_1, \psi_2$ 는 각 NOMA 사용자의 전력할당 계수로서 표현된다. 전력할당계수는  $\psi_1 < \psi_2$  ( $\psi_1 + \psi_2 = 1$ )로 주어지며 각 사용자들의 전력 합은  $P_1 + P_2 = 1$ 로 가정한다. 기지국에서 사용자와의 거리는  $d_i$ 로 나타내며 기지국 셀의 크기는 최대  $d=1$ 로 가정한다. NOMA와 OMA에서 가정한 채널은 레일리

페이딩에 가산 백색 가우스 잡음 (AWGN : Additive White Gaussian Noise)이 더해진 복소채널계수로서  $h_i \sim CN(0, \lambda_i = d_i^{-\alpha})$ 로 나타낸다. 평균이 0 분산이  $\lambda$ 로,  $\alpha$ 는 경로손실계수를 나타낸다. 채널 이득은 각 사용자별로  $|h_i|^2$ 로 각 사용자의 거리가  $d_1 < d_2 < d_3$ 과 같은 때 채널 이득은  $|h_1|^2 > |h_2|^2 > |h_3|^2$ 을 만족한다. IM 사용자의 경우 이상적인 환경을 가정하였다.

본 논문에서 사용하는 TFIM의 RB 모델은 OFDM 4G LTE를 고려한 모델로 5G narrow band 기준에도 확장하여 사용할 수 있을 것이라 기대한다.<sup>[11,12]</sup> NOMA-TFIM을 사용할 때 사용자에게 할당된 RB는 1개의 시간 슬롯에 대한 7개의 심볼과 12개의 부반송파를 포함한다. 그림 2는 NOMA-TFIM의 RB를 나타낸다. 각 RE 안에는 NOMA 신호를 포함하고 있다. 각 RE는  $T_j F_k$ 로 표현되며  $j$  ( $j \in 1, 2, \dots, 7$ )는 시간 슬롯의 인덱스이며  $k$  ( $k \in 1, 2, \dots, 12$ )는 부반송파의 인덱스를 나타낸다. 이때  $B=1(\text{Hz})$ ,  $T=1(\text{s})$ 로 가정한다. 하나의 RE로 구성된 NOMA 신호의 대역폭은  $B/12$ 이며 한 심볼당  $T/7$ 의 시간 동안 보내게 된다. 본 논문에서는 RE 하나에 2명의 사용자의 NOMA 신호로 구성하였다. 표 1은 RB 하나에 대한 TFIM과 FIM, TIM의 정보 비트수와 비활성화된 RE들을 비교하여 나타낸 표이다. 비활성화된 RE를  $\sigma$ 로 표현하였을 때 FIM의 경우 비활성화 되는 RE가 RB의 열에 해당하며 TIM의 경우 비활성화 되는 RE는 RB의 행에 해당한다. TFIM의 경우 하나의 비활성화된 RE ( $\sigma=1$ )를 통해 인덱스 정보를 받을 수 있다. FIM의 경우 RB의 열에 해당하는 부분이 비활성화 되어 총 12개의 경우의 수가 나오고 이를 [4]의 정보량 수식에

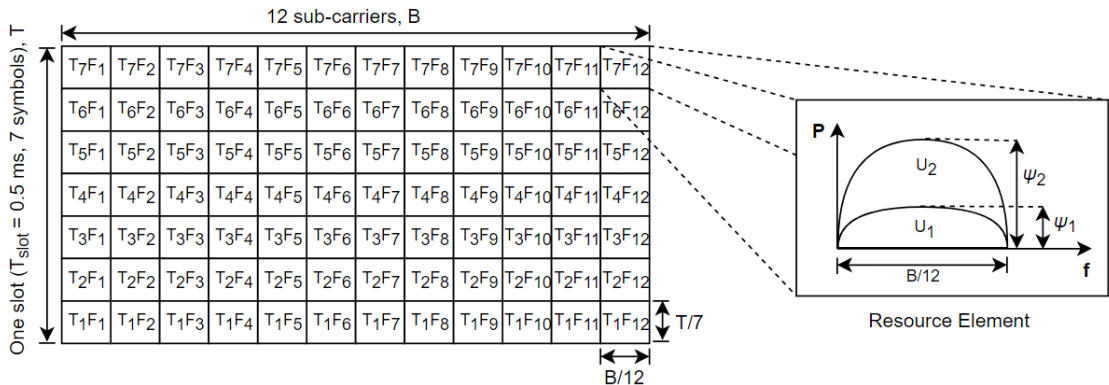


그림 2. TFIM의 자원 블록  
Fig. 2. Resource Block of TFIM

표 1. 제안하는 RB에 대한 TFIM, FIM, TIM의 정보 비트 수와 비활성화된 RE 비교

Table 1. Comparison of the number of Information bits and Unactivated RE of TFIM, FIM, and TIM for the proposed RB

Input bits	Unactivated RE		
	TFIM	FIM	TIM
000000	$T_1F_1$	$T_1F_1, T_2F_1, \dots, T_7F_1$	$T_1F_1, T_1F_2, \dots, T_1F_{12}$
000001	$T_1F_2$	$T_1F_2, T_2F_2, \dots, T_7F_2$	$T_2F_1, T_2F_2, \dots, T_2F_{12}$
000010	$T_1F_3$	$T_1F_3, T_2F_3, \dots, T_7F_3$	$T_3F_1, T_3F_2, \dots, T_3F_{12}$
000011	$T_1F_4$	$T_1F_4, T_2F_4, \dots, T_7F_4$	$T_4F_1, T_4F_2, \dots, T_4F_{12}$
000100	$T_1F_5$	$T_1F_5, T_2F_5, \dots, T_7F_5$	N/A
...	...	...	
000111	$T_1F_8$	$T_1F_8, T_2F_8, \dots, T_7F_8$	
001000	$T_1F_9$	N/A	
...	...		
111111	$T_6F_4$		

따라 계산하면  $\lfloor \log_2({}_{12}C_1) \rfloor = 3bits$ 에 해당하는 비트수가 나옴을 알 수 있으며 TIM의 경우 RB에 행에 해당하는 부분이 비활성화 되므로 총 7개의 경우의 수가 나오며 마찬가지로 정보량에 따라 계산하면  $\lfloor \log_2({}_7C_1) \rfloor = 2bits$ 로 계산된다. TFIM의 경우 RB 중 비활성화된 RE가 하나만 있으므로 모든 RE를 경우의 수로 사용할 수 있다. 총 84개의 경우의 수가 나오며 이를 정보량에 따라 계산하면  $\lfloor \log_2({}_{84}C_1) \rfloor = 6bits$ 에 해당하는 비트수를 얻을 수 있다.

### III. NOMA-TFIM의 채널 용량 분석

제안하는 시스템의 용량 분석을 위해 2명의 NOMA 사용자의 용량과 TFIM 사용자의 용량을 구한 후 최종적으로 NOMA-TFIM 용량을 분석해본다. NOMA의 용량은 기지국에서 인접한 사용자와 기지국에서 먼 사용자의 용량을 분석한다<sup>3,13</sup>.

먼저 송신 단에서 보내는 NOMA 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$x = \sum_{i=1}^2 \sqrt{P_i} S_i = \sqrt{\Psi_1 P} S_1 + \sqrt{\Psi_2 P} S_2 \quad (1)$$

여기서  $S_i$ 는 사용자의 신호를 의미한다. 수신 신호를 나타내면 다음과 같은 수식으로 나타낼 수 있다.

$$y_i = h_i x + n_i \quad (2)$$

식 (2)에서  $n_i$ 는 수신단에서의 가우시안 노이즈이다.

NOMA 사용자 중에서 기지국에 가까운 사용자는 perfect SIC를 통해 기지국에서 먼 사용자의 신호를 제거할 수 있다. 제거된 신호를 통해 NOMA 사용자 중 기지국에서 가까운 사용자의 용량을 나타낼 수 있으며 본 논문에서는 비활성화되는 RE를 바탕으로 NOMA 신호의 용량에도 영향을 줄 수 있다.

$$R_1 = \left( \frac{\mu - \sigma}{\mu} \right) TB \times \log_2(1 + \rho |h_1|^2 \Psi_1) \quad (3)$$

식 (3)은 기존의 기지국에서 가까운 NOMA 사용자에서 비활성화된 RE를 바탕으로한 achievable data rate를 나타낸다. 여기서  $\rho$ 는 전송 시 발생하는 신호대잡음비 (SNR: signal-to-noise ratio)로  $P/N_1$ 이며  $\rho |h_1|^2 \Psi_1$ 은 기지국에 인접한 사용자의 수신 SNR이다. 여기서  $\mu$ 는 전체 RE의 수 (7 symbols  $\times$  12 sub-carriers)를 나타내며  $\sigma$ 는 비활성화 된 RE의 수를 나타낸다. 기지국에서 먼 사용자의 용량은 SIC를 적용하지 못하므로 기지국에서 가까운 사용자의 간섭을 받게 된다.

$$R_2 = \omega \log_2 \left( 1 + \frac{\rho |h_2|^2 \Psi_2}{\rho |h_2|^2 \Psi_1 + 1} \right) \quad (4)$$

식 (4)에서  $\frac{\rho |h_2|^2 \Psi_2}{\rho |h_2|^2 \Psi_1 + 1}$ 는 기지국에서 먼 NOMA 사

용자의 수신 SNR이며  $\omega = \frac{\mu - \sigma}{\mu} TB$  라고 할 때, 기존의 기지국에서 먼 NOMA 사용자에서 비활성화된 RE를 바탕으로한 achievable data rate를 나타낸다.

마지막으로 이상적인 환경에서 랜덤 변수를 고려하지 않았으며 TFIM이 최대를 얻을 수 있는 정보 비트 수를 나타내면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{TFIM} = \lfloor \log_2({}_{\mu}C_{\sigma}) \rfloor \quad (5)$$

식 (5)는 비활성화 할 수 있는 전체 RE 수에 대하여 비활성화된 RE 수의 조합의 바닥함수로 나타낸다.

$$R_{NOMA} = R_1 + R_2 \quad (6)$$

$$R_{NOMA-TFIM} = R_{NOMA} + R_{TFIM} \quad (7)$$

식 (6)을 통해 NOMA의 사용자들의 총 achievable data rate와 TFIM의 이상적인 환경에서의 사용자의 최대 정보 비트수를 고려하면 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

본 논문에서 이론적인 NOMA의 에르고딕 용량을 구하기 위하여 [13]의 수식을 바탕으로 작성하였으며  $\omega = \frac{\mu - \sigma}{\mu} TB$ 를 고려한 기지국에서 가까운 사용자의 용량을 구하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_1^{erg} = \frac{\omega}{\ln 2} \int_0^\infty \left( \frac{1}{1+x} \right) e^{-\frac{x}{\lambda_1 \rho \psi_1}} dx \quad (8)$$

$$= \frac{\omega}{\ln 2} \left\{ -Ei\left( \frac{-1}{\lambda_1 \rho \psi_1} \right) e^{\frac{1}{\lambda_1 \rho \psi_1}} \right\}$$

여기서  $Ei(\cdot)$ 는 지수적분 (Exponential Integral) 함수이고  $R_1^{erg}$ 은 기지국에서 가까운 사용자의 에르고딕 용량을 나타낸다.

다음으로  $\omega = \frac{\mu - \sigma}{\mu} TB$ 를 고려한 기지국에서 먼 사용자의 에르고딕 용량을 수식으로 표현하면 다음과 같이 나타낸다.

$$R_2^{erg} = \frac{\omega}{\ln 2} \int_0^\infty \frac{1}{1+y} \left( \frac{\lambda_2 \rho \psi_2}{\lambda_2 \rho \psi_2 + \lambda_2 \rho \psi_1 y} \right) e^{-\frac{y}{\lambda_2 \rho \psi_2}} dy \quad (9)$$

$$= \frac{\omega \lambda_2 \rho \psi_2}{\ln 2 (\lambda_2 \rho \psi_2 - \lambda_2 \rho \psi_1)}$$

$$\times \left\{ -Ei\left( -\frac{1}{\lambda_2 \rho \psi_2} \right) e^{\frac{1}{\lambda_2 \rho \psi_2}} + Ei\left( -\frac{1}{\lambda_2 \rho \psi_1} \right) e^{\frac{1}{\lambda_2 \rho \psi_1}} \right\}$$

여기서  $R_2^{erg}$ 은 기지국에서 먼 사용자의 에르고딕 용량을 나타낸다. TFIM의 경우 이상적인 환경을 가정하여 고려하였으므로 최대로 받을 수 있는 정보비트 수를 나타내었다.

$$R_{NOMA}^{erg} = R_1^{erg} + R_2^{erg} \quad (10)$$

$$R_{NOMA-TFIM}^{exact} = R_1^{erg} + R_2^{erg} + R_{TFIM} \quad (11)$$

식 (10)과 최대로 받을 수 있는 TFIM의 정보비트 수인 식 (5)를 고려하면 NOMA-TFIM의 이론적인 용량은 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

#### IV. 모의실험 및 결과

본 논문에서 제안한 NOMA-TFIM의 성능을 평가하기 위해 Matlab 컴퓨터 모의실험을 이용하였다. 정확도를 높이기 위해 몬테카를로 시뮬레이션 반복 수행을 통해 시행하였다. 시스템에서 사용한 NOMA-TFIM의 모의실험 변수는 표 2에 나타내었다. 수신안테나에서 데이터를 받을 시 송신안테나의 채널 상태 정보 (CSI : Channel State Information)를 알고 있다고 가정하였다.

제안하는 기법인 NOMA-TFIM과 비교하는 모델은 NOMA-FIM, NOMA-TIM, NOMA, OMA이다. NOMA-TFIM의 시뮬레이션 수식은 achievable rate를 바탕으로 한 식 (7)로 구하였으며 이론적으로 분석한 수식은 식 (11)을 바탕으로 구하였다. IM 기법의 경우 동일한 이상적인 상황에서 랜덤 변수가 없는 경우의 최대 용량을 기반으로 실험하였다.

그림 3은 제안된 시스템과 OMA, NOMA, NOMA-TIM 및 NOMA-FIM의 송신 SNR에 따른 ESC (Ergodic Sum Capacity)를 구한 그래프를 보여준다. SNR=20dB를 기준으로 고려하면, 제안된 시스템은 OMA, NOMA, NOMA, NOMA-TIM 및 NOMA-FIM에 대비해 각각 평균 144.59%, 39.03%, 32.09%, 31.26%만큼 ESC가 높음을 확인하였다. 그래프 결과를 토대로 NOMA에 IM을 적용하였을 경우 더 높은 채널 용량을 얻을 수 있으며 시뮬레이션과 이론적인 수식의 유사한 결과를 통해 시뮬레이션 결과의 신뢰성을 볼 수 있으며 제안된 NOMA-TFIM 시스템의 우수성을 보여준다.

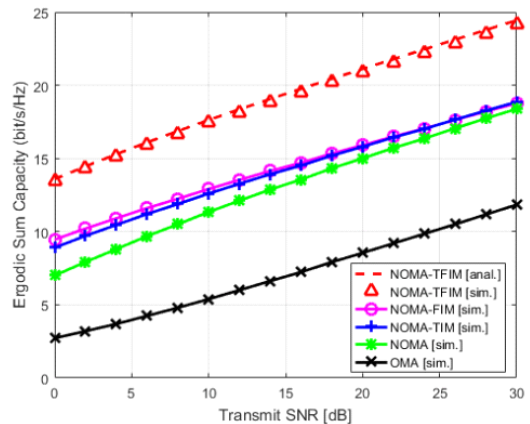


그림 3. 기존 기법들과 NOMA-TFIM의 SNR에 따른 용량 비교  
Fig. 3. SNR versus ESC comparison of NOMA-TFIM and conventional schemes

그림 4는 제안된 시스템에서 첫 번째 사용자에게 할당된 전력이 증가할 때의 송신 SNR에 따른 ESC 증가를 보여준다. 제안된 시스템은 표 2의 모의실험 변수 중 과워할당 부분을 제외한 나머지 변수들을 적용하였다. 시뮬레이션 결과를 통하여 송신 SNR이 20dB일 때의 ESC가 송신 SNR이 15dB, 10dB일 때와 비교하여 각각 평균 8.84%, 19.95% 만큼 더 높아지는 것을 보여준다. 이는 전송 SNR과 전력 할당이 제안된 시스템의 용량에 영향을 줄 수 있음을 증명한다.

그림 5, 6은 기존 기법들과 제안된 기법의  $U_1$ 과  $U_2$ 의 각각의 기지국과의 거리에 따른 용량을 비교한 그래프를 나타낸다. 송신 SNR=10dB와 표 2의 과워할당 계수를 기준으로 실험하였다. 그림 5의 경우에  $U_2$ 와  $U_3$ 의 거리가 각각  $d_2 = 0.5$ ,  $d_3 = 0.9$ 에 고정하고  $d_1$ 을 0.1에서 0.4까지 옮겨가며 시뮬레이션 하였다

표 2. NOMA-TFIM 모의실험 변수  
Table 2. Simulation Parameter of NOMA-TFIM

Parameter	Value
Pathloss exponent ( $\nu$ )	4
BS to User distance	$d_1 = 0.2$ $d_2 = 0.5$ $d_3 = 0.9$
Power allocation factor	$\Psi_1 = 0.1$ $\Psi_2 = \begin{cases} 0.3, & \text{for NOMA, OMA} \\ 0.9, & \text{otherwise.} \end{cases}$ $\Psi_3 = 0.6, \text{ for NOMA, OMA}$

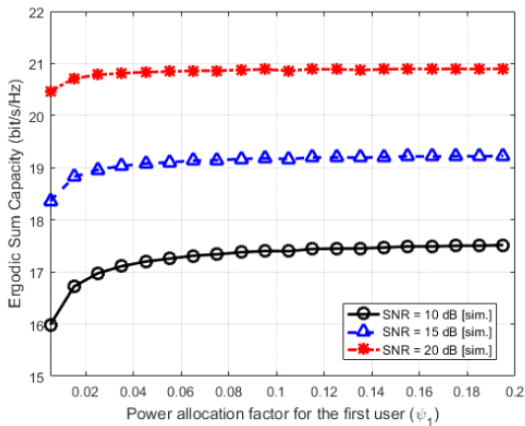


그림 4. NOMA-TFIM의  $U_1$ 의 과워할당계수 ( $\Psi_1$ )에 따른 용량 비교  
Fig. 4. Capacity comparison according to the power allocation factor ( $\Psi_1$ ) of NOMA-TFIM

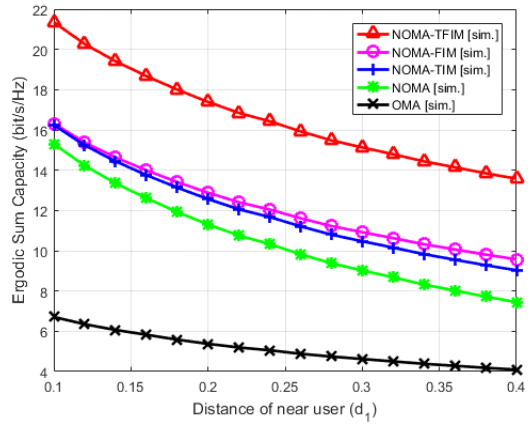


그림 5. 기존 기법들과 NOMA-TFIM의  $U_1$ 의 기지국과의 거리 ( $d_1$ )에 따른 용량 비교

Fig. 5. Capacity comparison according from BS to the distance of near user ( $d_1$ ) of NOMA-TFIM and conventional schemes

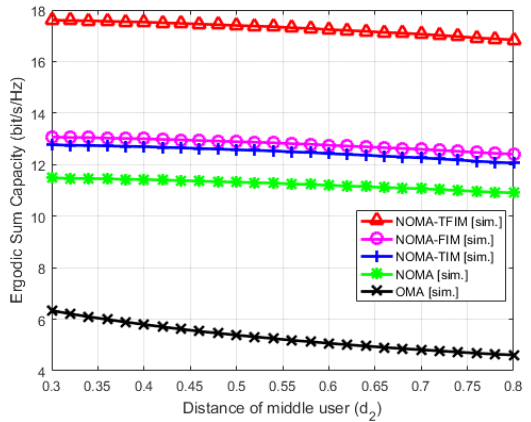


그림 6. 기존 기법들과 NOMA-TFIM의  $U_2$ 의 기지국과의 거리 ( $d_2$ )에 따른 용량 비교

Fig. 6. Capacity comparison according to the distance of middle user ( $d_2$ ) of NOMA-TFIM and conventional schemes

다. 그림 6의 경우  $U_1$ 과  $U_3$ 의 거리가 각각  $d_1 = 0.2$ ,  $d_3 = 0.9$ 에 고정하고  $d_2$ 를 0.3에서 0.8까지 옮겨가며 시뮬레이션하였다. 그림 5, 6의 시뮬레이션 결과를 통해 BS에서 가까울수록 ESC가 높음을 확인할 수 있었고 BS에서 멀어질수록 각각의 용량 감소폭이 줄어들음을 확인할 수 있다.

## V. 결론

본 논문은 무선환경에서 채널 용량 향상을 위하여

NOMA와 TFIM을 결합한 NOMA-TFIM 기법을 제안한다. IM 자원중에서 주파수와 시간을 함께 활용하여 기존의 기법들보다 더 높은 채널 용량을 확보를 기대할 수 있으며 이를 통해 한정된 자원들을 효율적으로 사용할 수 있을 것이라 기대한다.

모의실험을 통해 NOMA-TFIM이 기존의 OMA, NOMA, NOMA-TIM, NOMA-FIM 보다 각각 평균 144.59%, 39.09%, 32.09%, 31.26% 만큼 ESC가 높음을 확인하였다. 본 논문은 IM의 이상적인 환경을 고려하였으므로 후속 연구로 실제적인 환경을 고려한 비트에러율을 적용하여 더 정확한 결과를 얻을 수 있을 것이라 기대한다. IM의 자원 중 주파수와 시간 자원만을 사용하였으므로 다른 IM 자원을 적용한 확장 연구를 기대한다.

### References

[1] Q. C. Li, H. Niu, A. T. Papathanassiou, and G. Wu, "5G network capacity: Key elements and technologies," in *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 9, no. 1, pp. 71-78, Mar. 2014.

[2] AL-ERYANI, Yasser; HOSSAIN, Ekram, "Delta-OMA (D-OMA): A new method for massive multiple access in 6G," *arXiv preprint arXiv:1901.07100*, 2019.

[3] S. M. Islam, J. M. Kim, and K. S. Kwak, "On non-orthogonal multiple access (NOMA) in 5G systems," *J. KICS*, vol. 40, no. 12, pp. 2549-2558, 2015.

[4] E. Basar, M. Wen, R. Mesleh, M. Di Renzo, Y. Xiao, and H. Haas, "Index modulation techniques for next-generation wireless networks," in *IEEE Access*, vol. 5, pp. 16693-16746, 2017.

[5] Raed Y. Mesleh, et al., "Spatial modulation," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 57, no. 4, pp. 2228-2241, 2008.

[6] E. Soujeri, et al., "Frequency index modulation for low complexity low energy communication networks," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 23276-23287, 2017.

[7] S. Jacob, T. L. Narasimhan, and A. Chockalingam, "Space-time index modulation," *2017 IEEE WCNC*, San Francisco, CA, USA, Mar. 2017.

[8] J. W. Kim, S. Y. Shin, and V. C. Leung, "Performance enhancement of downlink NOMA by combination with GSSK," in *IEEE Wirel. Commun. Lett.*, vol. 7, no. 5, pp. 860-863, 2018.

[9] E. Arslan, A. T. Dogukan, and E. Basar, "Index modulation-based flexible non-orthogonal multiple access," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 9, no. 11, pp. 1942-1946, 2020.

[10] X. Chen, M. Wen, and S. Dang, "On the performance of cooperative OFDM-NOMA system with index modulation," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 9, no. 9, pp. 1346-1350, 2020.

[11] M. Lee and S. K. Oh, "On resource block sharing in 3GPP-LTE system," *The 17th Asia Pacific Conf. Commun. IEEE*, 2011.

[12] X. Lin, et al., "5G new radio: Unveiling the essentials of the next generation wireless access technology," *IEEE Commun. Standards Mag.*, vol. 3, no. 3, pp. 30-37, 2019.

[13] M. B. Shahab and S. Y. Shin, "A time sharing based approach to accommodate similar gain users in NOMA for 5G networks," *2017 IEEE 42nd Conf. LCN Wrkshps.*, pp. 142-147, Singapore, 2017.

김재오 (Jae Oh Kim)



2018년 2월 : 국립금오공과대학교 전자공학부 졸업  
 2020년 8월 : 국립금오공과대학교 IT융복합공학부 석사  
 2021년 4월~현재 : (주)오성전자 연구원

<관심분야> 무선통신, NOMA, MIMO  
 [ORCID:0000-0002-7725-9489]



**헨드라닝랏 데니 쿠스마 (Denny Kusuma Hendraningrat)**



2011년 6월 : Telkom대학교 통신공학부 졸업  
2020년 2월 : 국립금오공과대학교 IT융복합공학부 석사  
2020년 3월~현재 : 인도네시아 국가 표준화기관 표준 개발 분 석가

<관심분야> 무선통신, NOMA, MIMO

[ORCID:0000-0002-5111-6105]

**신 수 용 (Soo Young Shin)**



1999년 2월 : 서울대학교 전기공학부 졸업  
2001년 2월 : 서울대학교 전기공학부 석사  
2006년 2월 : 서울대학교 전기공학부 박사  
2010년~현재 : 국립금오공과대학교 전자공학부 교수

<관심분야> 5G/B5G 무선 접속 기술, 드론 응용, 혼합 현실, 블록체인, 머신러닝 및 딥 러닝

[ORCID:0000-0002-2526-2395]

**나로타마 바스카라 (Bhaskara Narottama)**



2015년 9월 : Telkom대학교 통신공학부 졸업  
2017년 8월 : Telkom대학교 전자통신공학부 석사  
2018년 9월~현재 : 국립금오공과대학교 IT융복합공학부 박사과정

<관심분야> 무선통신, 양자기술, 머신러닝

[ORCID:0000-0001-8596-1027]