

A New Incentive Based Bandwidth Allocation Scheme For Cooperative Non-Orthogonal Multiple Access

Kim Jong Won[†] · Kim Sung Wook^{††}

ABSTRACT

Non Orthogonal Multiple Access (NOMA) is a technology to guarantee the explosively increased Quality of Service(QoS) of users in 5G networks. NOMA can remove the frequent orthogonality in Orthogonal Multiple Access (OMA) while allocating the power differentially to classify user signals. NOMA can guarantee higher communication speed than OMA. However, the NOMA has one disadvantage; it consumes a more energy power when the distance increases. To solve this problem, relay nodes are employed to implement the cooperative NOMA control idea. In a cooperative NOMA network, relay node participations for cooperative communications are essential. In this paper, a new bandwidth allocation scheme is proposed for cooperative NOMA platform. By employing the idea of Vickrey-Clarke-Groves (VCG) mechanism, the proposed scheme can effectively prevent selfishly actions of relay nodes in the cooperative NOMA network. Especially, base stations can pay incentives to relay nodes as much as the contributes of relay nodes. Therefore, the proposed scheme can control the selfish behavior of relay nodes to improve the overall system performance.

Keywords : Non Orthogonal Multiple Access, Cooperative NOMA, Mechanism Design

협력 비직교 다중 접속 네트워크에서 새로운 인센티브 기반 주파수 할당 기법

김 종 원[†] · 김 승 욱^{††}

요 약

비 직교 다중 접속(NOMA : Non Orthogonal Multiple Access) 기술은 5G 네트워크의 등장으로 폭발적으로 증가한 사용자의 QoS(Quality of Service)를 보장하기 위한 기술이다. 비 직교 다중 접속 기술은 기존의 직교 다중 접속(OMA : Orthogonal Multiple Access) 기술에서 주파수의 직교성을 없애고 다른 신호를 구분하기 위해 전력을 차등적으로 할당하는 기술이다. NOMA 기술 중 협력 NOMA 기술은 거리가 먼 사용자들에게 보내기 위해 많은 전력을 소모하는 것이 아닌 중계 노드에게 신호를 보내어서 중계 노드가 대신 NOMA를 수행하는 방법이다. 하지만, 협력 NOMA에서는 중계 노드가 협력 NOMA에 참여하는 동기가 반드시 필요하다. 이를 위해 기지국은 중계 노드에게 인센티브를 지급할 수 있지만 중계 노드가 기여한 만큼 공정하게 지급해야 한다. 이러한 인센티브 체계를 수립할 때 발생하는 문제점이 있는데 그것은 중계 노드가 자신의 기여를 속인다면 기지국 입장에서는 전체 시스템 성능도 하락할 뿐 아니라 높은 인센티브를 지급해야 한다는 것이다. 본 논문에서는 협력 NOMA 네트워크에 참여하는 중계 노드들이 이기적으로 행동하여 거짓된 정보를 보고하는 것을 방지하기 위해 메커니즘 디자인을 사용한 기법을 제안한다. 메커니즘 디자인 중 VCG메커니즘을 사용하여 중계 노드들의 이기적인 행동을 제어하고 전체 시스템 성능을 높일 수 있도록 하였다. 실험 결과로 중계 노드들이 이기적으로 행동했을 때의 전체 시스템 성능보다 VCG 메커니즘을 사용하여 모두가 진실하게 행동했을 때의 전체 시스템 성능이 증가함을 보였다.

키워드 : 비직교 다중 접속, 협력 비직교 다중 접속, 메커니즘 디자인

1. 서 론

5G 네트워크 발전은 높은 용량의 화상이나 동영상 스트리밍 서비스, 게임 스트리밍 서비스 등의 증가로 사용자들은 많

은 트래픽과 빠른 통신 속도를 필요로 한다. 하지만, 사용자의 수가 폭발적으로 증가하여 기존 네트워크 기술로는 5G 사용자의 QoS(Quality of Service)를 보장해주기 어려워졌다. 이러한 문제를 해결하기 위해 5G 네트워크에서는 대규모의 연결에 대한 주파수를 효율적으로 사용하는 방법이 연구되어 왔다. 주파수를 효율적으로 사용하기 위해서는 밀리미터파를 활용하는 스몰 셀 기술이나 기지국에 많은 안테나를 부착하는 대규모 다중 안테나 기술 등이 각광받고 있다[1].

하지만 스몰 셀 기술의 경우 기지국 수를 증가하는데 필요한

※ 본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학ICT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음(IITP-2020-2018-0-01799).

† 비 회 원 : 서강대학교 컴퓨터공학과 석사과정

†† 종신회원 : 서강대학교 컴퓨터공학과 교수

Manuscript Received : January 18, 2021

Accepted : February 15, 2021

* Corresponding Author : Kim Sung Wook(swkim01@sogang.ac.kr)

설치 비용과 유지 비용이 문제가 된다는 단점이 있다. 그리고 대규모 다중 안테나 기술의 경우 안테나의 증가에 따른 안테나 간의 간섭 관리나 유지 비용 등의 문제가 있다. 그래서 기지국이 사용하는 주파수 효율을 향상할 수 있는 다중 접속 기술들이 제시되었다. 특히, 현재 많은 무선 시스템에서 사용하고 있는 다중 접속 기술인 직교 주파수 분할 다중 접속(OFDMA: Orthogonal Frequency Division Multiple Access) 기술에서 직교성을 없애는 비 직교 다중 접속(NOMA: Non-Orthogonal Multiple Access) 기술이 제안되었다[2,3].

NOMA 기술은 전력을 차등적으로 분배하여 각 사용자의 신호를 보내는 것이다. 송신자가 같은 주파수 대역에서 신호마다 다른 전력을 할당하여 보내면 수신자들이 연속 간섭 제거(SIC: Successive Interference Cancellation)를 사용하여 자신의 신호를 찾을 수 있다[4]. OFDMA 기술에서 주파수를 나누는 것보다 더 넓은 주파수 대역을 사용하므로 더 높은 통신 속도를 기대할 수 있다. 또한, 사용자가 요구하는 속도나 채널 상태에 따라 전력을 달리 할당하여 주파수를 효율적으로 사용할 수 있다[5].

NOMA 기술은 OFDMA 기술보다 더 높은 통신 속도를 보이지만 기지국과 사용자 간의 거리가 멀어질수록 전력을 많이 소비해야 한다는 단점이 있다. 또한, 기지국은 매우 먼 사용자에게 보낼 때 높은 전력을 사용하지 않으면 신호 대 간섭 잡음비(SINR: Signal to Interference-plus-Noise Rate)가 낮아지므로 오류 발생이 많아진다. 이러한 단점을 해결하기 위해 등장한 기술이 협력 비직교 다중 접속 기술(Cooperative Non-Orthogonal Multiple Access)이다. 협력 NOMA는 NOMA 시스템의 특성상 사용자들이 자신의 신호뿐만 아니라 다른 사용자의 신호도 같이 받을 수 있는 NOMA의 특징에서부터 시작되었다[6]. 협력 NOMA에서는 기지국과 가까운 중계 노드가 먼 사용자의 신호를 복호화한 뒤 다시 보내주면서 전력을 적게 소모하여도 오류 발생을 줄일 수 있다.

협력 NOMA는 기존 NOMA 기술보다 효율적이고 다양한 네트워크 상황에서 적용할 수 있지만 근처 통신이 가능한 기기들 중에서 기지국과 가까운 기기가 협력을 해주어야 한다. 하지만, 협력을 해주는 기기들은 굳이 다른 기기를 위해 자신의 전력을 소모할 이유가 없다. 협력을 이끌어내기 위해서 기지국은 협력하여 도와준 기기 즉, 중계 노드에게 인센티브를 지급해야 한다. 인센티브를 지급할 때 가장 큰 문제는 중계 노드들이 모두 진실하게 정보를 보내야 공정하게 이루어질 수 있다는 점이다. 하지만, 모든 중계 노드는 매우 이기적이고 자신의 이득을 최대화하기 위해 거짓된 정보를 보낼 수 있다. 거짓된 정보로 인센티브를 더 높게 받을 수 있다면 인센티브 메커니즘이 공정하지 못한 것이다.

또한 거짓된 정보는 협력 NOMA 전체 시스템 성능을 낮출 수 있다. 그렇기 때문에 인센티브를 높게 받는 것을 방지하고 공정하고 효율적으로 인센티브를 지급하기 위해 본 논문에서는 게임 이론 중 한 분야인 메커니즘 디자인(Mechanism Design)을 사용한 기법을 제안한다[7]. 본 논문에서 사용할 메커니즘

디자인은 비크리-클라크-그로브즈(VCG: Vickrey-Clarke-Groves) 메커니즘으로 비크리 경매 상황에서 참가자들이 모두 진실하게 행동하게끔 설계하는 진실 메커니즘(Truthful Mechanism)이다[7].

본 논문에서는 협력 NOMA 네트워크에서 VCG 메커니즘을 적용하는 인센티브 기반 주파수 할당 기법을 제안한다. 제안하는 기법을 이용하면 중계 노드를 평가하는 알고리즘이나 거짓 정보를 보내지 못하도록 추가정보를 주고받을 필요가 없다. 이에 따라서 알고리즘의 추가나 통신 횟수가 늘어나지 않고 주파수를 효율적으로 할당할 수 있다. 제안하는 기법을 정리하면 다음과 같다.

1. NOMA 네트워크에서 기지국과 사용자 간의 거리가 멀 경우 높은 전력을 소모해야 하므로 중계 노드에게 협력을 부탁한다. 중계 노드는 협력을 받아들일 경우, 근처에 있는 사용자들과 NOMA 클러스터를 이룬다.
2. 중계 노드는 클러스터 내에 사용자들에게 자신의 전력 한계 내에서 NOMA로 전력을 분배한다. 분배에 따른 예상 QoS와 자신이 소모한 전력을 기지국에게 보고한다. 이 때, 중계 노드는 거짓으로 보고할 수 있다.
3. 기지국은 보고받은 중계 노드의 QoS와 소모 전력을 보고 중계 노드에게 얼마만큼의 주파수를 할당할 것인지 결정한다. 중계 노드가 거짓으로 보고할 경우 네트워크의 전체 성능이 나빠질 수 있다. 본 논문에서는 중계 노드가 모두 진실하게 보고할 수 있도록 VCG 메커니즘을 활용한 주파수 할당 및 인센티브 지급 기법을 제안한다.

본 논문의 구성은 2장에서는 메커니즘 디자인과 관련된 설명과 협력 NOMA 네트워크에 대한 관련 연구를 보여주고, 3장에서는 고려하는 네트워크 상황과 제안하는 기법에 대해서 자세하게 설명한다. 4장에서는 실제 시스템을 구축해 전체 성능이 높아짐을 보여준다. 마지막으로, 5장에서 결론을 짓고 논문을 마무리한다.

2. 관련 연구

2.1 메커니즘 디자인과 VCG 메커니즘

메커니즘 디자인은 게임 이론(Game Theory)의 한 분야로 역 게임 이론이라고 한다. 그 이유는 게임 이론이 게임이라는 상황에서 참가자들의 전략을 분석하고 이에 대한 결과를 도출해내는 이론인 것에 반해 메커니즘 디자인은 참가자들이 특정 행동과 전략을 선택하게끔 유도하는 방법을 설계하는 이론이다[7].

메커니즘 디자인 중 VCG 메커니즘은 두 가지 특성이 있는데 직접표출성(Direct revelation)과 유인합치성(Incentive compatibility)이다. 직접표출성은 경매 상황에서 입찰자가 입찰할 때, 자신의 이익을 위해 거짓된 입찰을 하거나 정보

를 주는 행위를 허용하는 특성이다[8]. 그리고 유인합치성은 입찰자가 자신의 입찰이나 정보를 진실하게 말하는 것이 최선의 전략인 특성이다. VCG 메커니즘의 할당 방식과 지불 방식을 정리하기 위해 경매자가 경매를 열어 n 명의 입찰자가 있는 상황을 가정한다. b_i 를 입찰자 i ($i=1,2,\dots,n$)의 입찰이라고 하며 $\mathbf{x} = x_1, x_2, \dots, x_n$ 를 물건 할당 벡터라고 할 때, $v_i(b_i, x_i)$ 를 물건 할당에 따른 각 입찰자들의 이득이라고 가정한다. 이 때 VCG 메커니즘에서 할당 방식은 다음 Equation (1)과 같다[8].

$$\max_{\mathbf{x}} \sum_{i=1}^n v_i(b_i, x_i) \quad (1)$$

VCG 메커니즘의 할당 방식은 각 입찰자의 이득의 합을 최대로 하는 것이다. 즉, 사회적인 이득을 최대로 하는 것이 VCG 메커니즘의 목표이다. 그리고 할당 결과에 따라 입찰자의 지불 방식은 입찰자가 경매에 참가하지 않았을 때의 사회적인 이득과 입찰자가 경매에 참여했지만 입찰자의 이득을 제외한 사회적인 이득의 차로 계산한다. \mathbf{x}_i^* 를 각각 입찰자 i 가 제외된 상태에서의 사회적인 이득이 최대가 될 수 있는 할당 벡터라고 가정한다. 그리고 \mathbf{x}^* 를 입찰자 i 가 포함된 상태에서의 사회적인 이득이 최대가 될 수 있는 할당 벡터라고 할 때, VCG 메커니즘의 지불 방식은 다음 Equation (2)와 같다[8].

$$p_i = \sum_{j=1, j \neq i}^n v_j(b_j, \mathbf{x}_{-i}^*) - \sum_{j=1, j \neq i}^n v_j(b_j, \mathbf{x}^*) \quad (2)$$

VCG 메커니즘의 지불 방식은 모든 입찰자가 자신의 입찰에 따라 다른 입찰자들에게 준 손해를 지불하면서 물건을 가져가는 방식이다. VCG 메커니즘에서 모든 입찰자는 자신이 물건을 할당받기 위해 물건에 대한 평가를 거짓으로 입찰할 수 있다. 하지만, 거짓으로 입찰하면 그만큼 다른 입찰자에게 준 손해를 지불해야 하므로 진실한 입찰을 하는 것이 지배적인 전략이다.

2.2 NOMA 전력 할당 방법

NOMA 네트워크에서 전력을 할당하는 방식은 Fig. 1과 같다. 먼저, 기지국은 사용자인 UE1과 UE2에게 NOMA로 통신을 하기 위해서 UE1과 UE2의 채널 상태를 확인한다. 채널에 다른 간섭이 없다는 조건 하에 UE1이 UE2보다 기지국에 가까우므로 UE1의 채널 상태가 UE2보다 좋은 상태이다. 이를 $|h_1|^2 > |h_2|^2$ 로 표현한다. NOMA에서는 더 좋은 채널 상태를 가진 UE에게 적은 전력을 할당한다. 이는 송신 전력이 높을수록 더 먼 거리의 UE에게 제대로 도달할 확률이 증가하기 때문이다. 전력 할당이 끝나면 UE1과 UE2 모두에게 혼합된 신호를 보낸다. 신호가 수신이 되면 UE1과 UE2는 SIC를 이용하여 신호를 구분한다. 기지국의 최대 송신 전력이 P_{BS} 이라고 가정

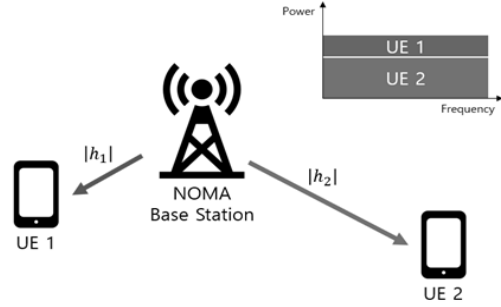


Fig. 1. NOMA Power Allocation

한다. 그리고 전력 할당을 a_1, a_2 ($a_1 + a_2 = 1$)라고 가정했을 때, SIC에 의해 각 UE가 받을 수 있는 최대 통신 속도(Maximum Throughput)는 다음 Equation (3)과 같다[9].

$$R_{UE1} = B \log_2 \left(1 + \frac{a_1 P_{BS} |h_1|^2}{\eta_{UE1}} \right) \quad (3)$$

$$R_{UE2} = B \log_2 \left(1 + \frac{a_2 P_{BS} |h_2|^2}{a_1 P_{BS} |h_2|^2 + \eta_{UE2}} \right)$$

여기서, B 는 송신자가 할당 받은 주파수 대역 즉, 대역폭이다. η_{UE1}, η_{UE2} 은 각 UE의 채널에서 발생하는 가산성 백색 가우시안 잡음이다. UE2는 더 적은 전력을 가진 UE1의 신호를 잡음 취급하여 기존 가산성 백색 가우시안 잡음에 UE1의 신호를 더한다. 하지만, UE1의 경우에는 UE2의 신호가 상대적으로 크므로 잡음 취급을 할 수 없고 UE2의 신호를 먼저 제거한 다음 자신의 신호를 찾는다. 즉, UE2의 경우에는 UE1의 신호를 잡음 취급하고 바로 복호화하며, UE1은 SIC를 이용하여 UE2 신호를 복호화한 뒤 자신의 신호가 아니므로 제거한 다음 자신의 신호를 찾을 때까지 반복해야 한다.

2.3 협력 비직교 다중 접속 네트워크

협력 NOMA는 중계 노드가 협력하여 통신하므로 주파수 할당 기법이나 전력 할당 기법 등의 여러기법들이 제안되었다. 5G NOMA 네트워크에서 연결상태가 좋지 않은 사용자의 수신 신뢰성을 높이기 위해 초 광대역이나 블루투스처럼 근거리 통신을 이용하여 협력 NOMA를 진행하는 기법을 제안하였다. 두 가지 단계가 있으며, 직접 전송하는 단계와 협력하는 단계가 있다. 직접 전송하는 단계는 기지국이 NOMA를 이용하여 각 사용자에게 데이터를 보내는 단계이다. 그리고 협력 단계에서는 근거리 통신을 통해 협력하는 단계로 각 사용자들이 다시 메시지를 보내는 단계이다. 이와 같이 협력을 통하여 전송을 하였을 때 기존의 NOMA보다 중단 확률과 통신 속도가 높아지는 것을 확인할 수 있다[10].

그리고 매크로 셀 기지국이 스몰 셀 기지국에게 사용자 신호를 보내고 주파수를 할당하는 식으로 중계 노드를 사용하는 기법도 연구되었다. 이 기법은 매크로 셀 기지국에서 OMA로 주파수를 할당하고 스몰 셀에서 NOMA를 이용하여 전력을

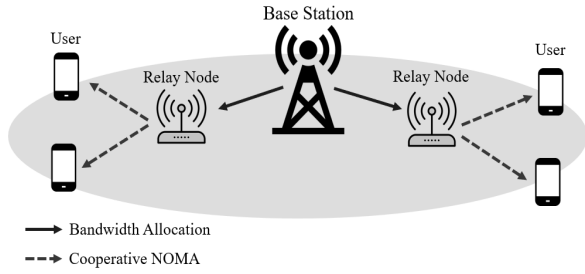


Fig. 2. Cooperative NOMA Network

할당하여 처리하는 OMA-NOMA 기법이다. 먼저, 스몰 셀 기지국이 통신 속도가 높아지게끔 전력을 할당한다. 그 다음, 매크로 셀에서 주파수를 통신 속도가 가장 높아지게끔 스몰 셀에게 할당한다[11].

3. 제안 기법

3.1 협력 NOMA 네트워크

본 논문에서 고려하는 협력 NOMA 네트워크의 구조는 Fig. 2와 같이 구성된다. 기지국의 목표는 NOMA 기술로 사용자의 QoS를 높여주며 사용하는 전력을 줄이는 것이다. 기지국과 떨어져 채널 상태가 낮은 사용자들과 통신을 하기 위해서 가까운 중계 노드에게 협력 NOMA를 요청한다[6]. 협력에 참여하는 중계 노드들은 자신의 주변에 있는 사용자들과 협력 NOMA 클러스터를 이룬다. 고려하는 네트워크는 n 개의 중계 노드 $N = \{R_1, R_2, \dots, R_n\}$ 와 m 개의 사용자 $M = \{D_1, D_2, \dots, D_m\}$ 로 이루어진다. 클러스터에 포함된 사용자들은 데이터를 직접 기지국에게 받는 것이 아닌 중계 노드에서 받게 되며 사용자들은 자신이 받은 QoS에 따라 중계 노드에게 돈을 지불한다. 사용자들은 단 하나의 클러스터에만 가입할 수 있으며 중복하여 가입할 수 없다. 기지국은 자신이 가진 주파수 대역을 PRB (Physical Resource Block)로 나누어서 클러스터에게 할당한다. 중계 노드는 주파수를 받으면 자신의 전력 한계 내에서 사용자에게 전력을 할당한다. 중계 노드 $R_i \in N$ 에서 사용자 $D_j \in M$ 까지의 채널 상태를 $|h_{R_i, D_j}|^2$ 라고 할 때, 채널 상태에 따라 전력이 할당된다. 고려하는 네트워크의 모든 채널은 레일리 페이딩(Rayleigh Fading) 채널이며 가산성 백색 가우시안 잡음을 가진다. 중계 노드와 사용자 간의 채널 상태가 내림차순 즉, $|h_{R_i, D_1}|^2 \geq |h_{R_i, D_2}|^2 \geq \dots \geq |h_{R_i, D_m}|^2$ 일 때 사용자 D_j 의 통신 속도는 다음 Equation (4)와 같다[6].

$$R_{D_j} = B_{R_i} \log_2 \left(1 + \frac{P_{D_j} |h_{R_i, D_j}|^2}{\sum_{k=1}^{j-1} P_{D_k} |h_{R_i, D_k}|^2 + \eta_{D_j}} \right), \quad (4)$$

$$s.t., R_i \in N, \forall i = 1, 2, \dots, n, D_j \in M, \forall j = 1, 2, \dots, m$$

여기서, B_{R_i} 는 중계 노드 R_i 가 할당 받은 대역폭이며 P_{D_j} 는 중계 노드 R_i 가 채널 상태에 따라 사용자 D_j 에게 할당한 전력

이다. 그런데 NOMA로 통신하기 위해서는 두 가지 조건을 만족해야 한다. 사용자마다 비트 에러율을 보장하기 위한 SINR 최소 조건과 사용자 측에서 SIC를 할 수 있도록 하는 전력의 최소 차이 조건이다[12,13]. 먼저, 중계 노드가 보낸 각 사용자의 신호가 일정한 수준의 SINR을 보장할 수 있어야 한다. 왜냐하면 SINR에 따라서 사용자가 받는 신호의 오류 수준이 달라지기 때문이다[12]. 중계 노드 R_i 와 사용자 D_j 의 SINR은

$$\text{Equation (4)에서의 } \frac{P_{D_j} |h_{R_i, D_j}|^2}{\sum_{k=1}^{j-1} P_{D_k} |h_{R_i, D_k}|^2 + \eta_{D_j}}$$

력을 할당 받은 사용자들의 신호가 간섭이 된다. 원하는 비트 에러율에 대한 SINR 조건식은 다음 Equation (5)와 같다.

$$\frac{P_{D_j} |h_{R_i, D_j}|^2}{\sum_{k=1}^{j-1} P_{D_k} |h_{R_i, D_k}|^2 + \eta_{D_j}} \geq \text{SINR}_{th}(q, \epsilon) \quad (5)$$

여기서, q 는 기지국이나 중계 노드가 사용하는 QAM 비트 수이다. ϵ 는 필요한 비트 에러율이다. $\text{SINR}_{th}(q, \epsilon)$ 는 기지국이 사용하는 QAM 비트 수와 필요한 비트 에러율에 따른 최소 보장해야 하는 SINR이다.

다음 조건은 송신자가 보낸 여러 사용자의 신호가 섞인 상태의 신호를 받은 수신자가 자신의 신호를 찾기 위해 SIC 수행을 위한 조건이다. 일정한 수준의 전력 차이가 존재해야지만 신호를 구분할 수 있다. 중계 노드 R_i 가 전력 할당할 때, 사용자 D_j 가 SIC 수행을 위한 조건은 다음 Equation (6)과 같다[13].

$$P_{D_j} |h_{R_i, D_{j-1}}|^2 - \sum_{k=1}^{j-1} P_{D_k} |h_{R_i, D_{j-1}}|^2 \geq P_{th}, \quad (6)$$

$$s.t., D_j \in M, \forall j = 2, 3, \dots, m$$

여기서, P_{th} 는 SIC에 의해 신호를 구분할 수 있는 최소 전력 차이이다. 다음과 같은 조건을 모두 만족하는 전력 할당에 대한 통신 속도 공식은 다음 Equation (7)과 같이 정리할 수 있다.

$$R_{D_j} = B_{R_i} \log_2 \left(1 + \frac{P_{D_j} |h_{R_i, D_j}|^2}{\sum_{k=1}^{j-1} P_{D_k} |h_{R_i, D_k}|^2 + \eta_{D_j}} \right), \quad (7)$$

$$s.t., \begin{cases} \frac{P_{D_j} |h_{R_i, D_j}|^2}{\sum_{k=1}^{j-1} P_{D_k} |h_{R_i, D_k}|^2 + \eta_{D_j}} \geq \text{SINR}_{th}(q, \epsilon) \\ P_{D_j} |h_{R_i, D_{j-1}}|^2 - \sum_{k=1}^{j-1} P_{D_k} |h_{R_i, D_{j-1}}|^2 \geq P_{th}, \\ D_j \in M, \forall j = 2, 3, \dots, m \\ \sum_{j=1}^m P_{D_j} \leq P_{R_i} \end{cases}$$

여기서, 3번째 조건은 중계 노드가 사용자에게 할당한 전력의 합이 자신의 최대 송신 전력인 P_{R_i} 를 넘으면 안 된다는 의미이다.

3.2 인센티브 기반 주파수 할당 기법

제안하는 기법에서 VCG 메커니즘을 적용하기 위해 VCG 메커니즘과 같은 차가경매 상황을 만들어낸다. 중계 노드들은 NOMA 통신을 받은 사용자들의 예상 QoS에 따른 값을 입찰한다. 기지국은 각 중계 노드의 입찰을 보고 가장 시스템 성능이 높아지게끔 주파수 대역을 할당한다. 사용자의 QoS는 사용자가 필요한 통신 속도와 실제 받은 통신 속도의 비율로 계산된다. 이를 식으로 나타내면 Equation (8)과 같다.

$$Q_{D_j}(B_{R_i}, P_{D_j}) = \frac{R_{D_j}(B_{R_i}, P_{D_j})}{R_{D_j}^{req}} \quad (8)$$

여기서, $R_{D_j}(B_{R_i}, P_{D_j})$ 는 중계 노드가 할당받은 대역폭과 사용자에 할당된 전력에 따른 사용자 D_j 의 통신 속도이며 $R_{D_j}^{req}$ 는 사용자 D_j 가 필요한 통신 속도이다. 중계 노드는 각 사용자에게 보장한 QoS에 따라 통신 요금을 받는다. 각 중계 노드가 협력 NOMA에 참여하여 얻는 효용 함수(Utility Function)는 Equation (9)와 같다.

$$v_{R_i}(B_{R_i}) = \sum_{j=1}^m C(Q_{D_j}(B_{R_i}, P_{D_j})) - \delta(P_{R_i}) \quad (9)$$

s.t., P_{R_i}

여기서, $C()$ 은 보장한 QoS에 따라 단조롭게 증가하는 사용자가 지불하는 통신 요금이다. P_{R_i} 은 중계 노드 R_i 가 소모한 전체 전력이다. $\delta()$ 은 소모한 전력에 따라 단조롭게 증가하는 가격 함수로 $C()$ 와 같은 단위이다. 즉, 중계 노드의 효용 함수는 할당 받은 대역폭을 활용하여 각 사용자에게 보장한 QoS에 따른 통신 요금과 자신이 소모한 전체 전력에 대한 가격의 차이이다. 기지국 입장에서는 중계 노드의 효용 함수가 높으면 높을수록 높은 QoS를 보장했거나 낮은 전력을 소모한 것이다. 그렇기 때문에 중계 노드 효용 함수의 합이 가장 높은 상태가 전체 시스템 성능을 높인 상태이다. 기지국은 전체 시스템 성능을 높이기 위해 대역폭 경매를 열어서 중계 노드들의 효용 함수를 입찰 받는다. 중계 노드 R_i 는 입찰 $\mathbf{b} = \{b_{R_i}, b_{R_2}, \dots, b_{R_n}\}$ 를 제출한다. 입찰 \mathbf{b} 는 Equation (9)에서 정의한 자신이 중계 노드로 선택되었을 때의 효용 함수이며 자신의 이익을 위해 기지국에게 거짓된 효용 함수를 입찰할 수 있다. 즉, $v_{R_i} = b_{R_i}$ 이면 진실하게 보고한 것이고 $v_{R_i} \neq b_{R_i}$ 일 경우 거짓으로 보고한 것이다. 기지국은 중계 노드가 제출한 입찰에 따라 평가 함수를 최대로 하는 대역폭 할당 벡터 $\mathbf{x} = \{x_{R_1}, x_{R_2}, \dots, x_{R_n}\}$ 을 찾는다. 이를 수식으로 나타내면 다음 Equation (10)과 같다[8].

$$\max_{\mathbf{x}} \sum_{i=1}^n b_{R_i}(x_{R_i}) \quad (10)$$

하지만, 이기적인 중계 노드가 자신의 이익을 위해 기지국에게 거짓된 정보를 보고하여 많은 대역폭을 얻으려고 행동

할 수 있다. 이러한 이기적인 행동은 전체 시스템 성능을 낮추는 결과를 불러온다. 제안 기법에서는 이러한 중계 노드들의 이기적인 행동을 막고 진실한 보고를 하게 하기 위해 중계 노드들이 받는 효용 함수에서 VCG 지불을 뺀다. VCG 메커니즘에서 자신의 효용 함수를 진실하게 보고하게 하기 위해 2.1절에서 소개한 바와 같이 중계 노드 R_i 가 메커니즘에 참가하지 않았을 때의 전체 시스템 성능과 중계 노드 R_i 가 메커니즘에 참여했지만 중계 노드 R_i 의 이익을 제외한 전체 시스템 성능의 차 즉, 중계 노드 R_i 가 참여함으로써 생기는 다른 중계 노드가 받는 손해를 지불한다. 각 중계 노드의 입찰 벡터 $\mathbf{b} = \{b_{R_1}, b_{R_2}, \dots, b_{R_n}\}$ 에 따라 전체 중계 노드의 평가 함수의 합이 가장 높아지는 할당 벡터를 \mathbf{x}^* 으로 가정한다. 중계 노드 R_i 가 제외된 경매에서 평가 함수의 합이 가장 높아지는 할당 벡터는 $\mathbf{x}_{-R_i}^*$ 으로 가정한다. 할당 벡터에 따른 중계 노드 R_i 의 입찰 함수는 $b_{R_i}(\mathbf{x})$ 라 할 때, 중계 노드 R_i 의 VCG 지불은 다음 Equation (11)과 같다[8].

$$\theta_{R_i} = \sum_{j=1, j \neq i}^n b_{R_j}(\mathbf{x}_{-R_i}^*) - \sum_{j=1, j \neq i}^n b_{R_j}(\mathbf{x}^*) \quad (11)$$

중계 노드 R_i 가 협력 NOMA에 참여함으로써 얻을 수 있는 전체 인센티브는 실제로 얻은 효용 함수와 VCG 지불의 차로 다음 Equation (12)와 같이 정의한다.

$$U_{R_i} = v_{R_i}(x_{R_i}) - \theta_{R_i} \quad (12)$$

VCG 메커니즘 하에 중계 노드가 거짓으로 보고하여 다른 중계 노드에게 준 피해가 커지면 가 높아지게 되고, 전체 이익은 줄어들게 된다. 이에 따라서 사용자들은 대역폭 할당에 대한 입찰을 할 때 진실하게 입찰하는 것이 지배적인 전략이 된다. 이는 협력 NOMA 대역폭 할당에서 거짓된 정보에 의한 잘못된 할당을 막을 수 있다.

4. 성능 평가

본 장에서는 논문이 고려하는 네트워크의 환경을 정의하고 제안한 기법에 대한 결과를 비교 분석한다. 본 논문에서 고려하는 네트워크의 시스템 파라미터는 Table 1과 같다. 기지국의 수는 1개이며 기지국이 소유한 중심 주파수는 3000MHz이며 대역폭은 50MHz이다. 그리고 부 반송파의 크기는 60kHz이다. 협력 NOMA에 참여할 수 있는 중계 노드의 수는 5개이다. 그리고 통신을 필요로 하는 사용자는 10~30개로 증가한다. 모든 중계 노드와 사용자의 위치는 기지국을 중심으로 무작위로 배치된다. 통신을 할 때는 QAM 비트 수를 4로 사용하며, 거리에 따라 변화하지 않는다. 그리고 필요 에러 비트율을 1000개당 1개로 설정한다. 실험 결과의 분석은 VCG 메커니즘 디자인을 적용한 본 논문에서 제안하는 기법과 기존의 협력 NOMA 주파수 및 전력 할당 방식과 OMA-

Table 1. System Parameters

Notation	Value	Description
BS	1	No. of base station
n	5	No. of relay node
m	10-30	No. of user
B	50 MHz	Bandwidth of base station
P_{th}	10 dBm	Minimum power difference for SIC
q	4	QAM bits
ϵ	10^{-3}	Required bit error rate

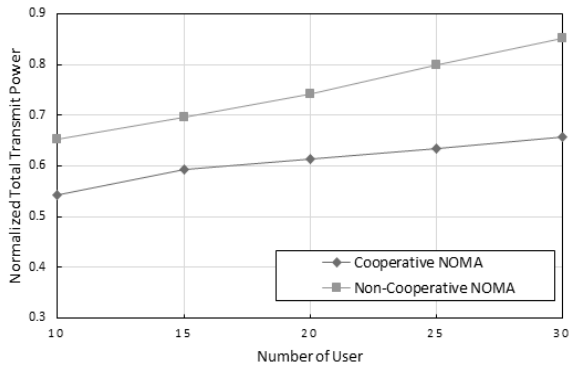


Fig. 3. Normalized Total Transmit Power Over Number of User

NOMA 주파수 및 전력 할당 기법과 비교한다[10,11]. 모든 기법에서 중계 노드는 거짓으로 보고하여 이득을 얻을 수 있으면 최대한 거짓말을 하려고 한다.

Fig. 3은 기존의 NOMA와 협력 NOMA의 차이를 보이기 위해 사용자 수에 따른 전체 송신 전력을 보여준다. 전체 송신 전력은 협력 NOMA를 사용할 경우 중계 노드가 사용자에게 데이터를 보내는 전력과 기지국과 중계 노드 간의 데이터를 보낼 때 쓰이는 전력의 합이다. 협력 NOMA를 사용하지 않을 경우 기존 기지국에서 NOMA를 사용하여 모든 사용자에게 보내는 방법이다. 전력의 차이를 측정하기 위해 모든 사용자는 같은 처리량을 원하며 각 중계 노드에게 할당되는 주파수도 모두 같다. 협력 NOMA를 사용할 경우 전력 소모가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 그리고 사용자가 증가함에 따라 전력 소모의 증가 폭이 협력 NOMA가 더 적은 것을 확인할 수 있다.

Fig. 4는 사용자 수에 따른 전체 처리량을 보여준다. 전체 처리량은 통신 실험 상황이 끝나고 각 사용자들이 받은 모든 처리량의 합을 나타낸다. 사용자 수가 적을 때에는 중계 노드들이 거짓말을 하여도 충분히 대역폭을 나누어줄 수 있기 때문에 모든 기법의 처리량이 비슷하다. 하지만, 사용자 수가 증가할수록 전체 처리량의 차이가 보이기 시작한다. VCG 메커니즘을 사용할 경우 중계 노드가 거짓으로 보고하는 경우가 없으며 이에 따라서 최대 효율을 낼 수 있도록 주파수가 분배가 되었다. 하지만, VCG 메커니즘을 사용하지 않을 경우는 중계 노드들이 거짓 보고를 하여서 이득을 취할 수 있으므로 거짓 보고를 하게 된다. 거짓 보고에 의해 사용했을 때

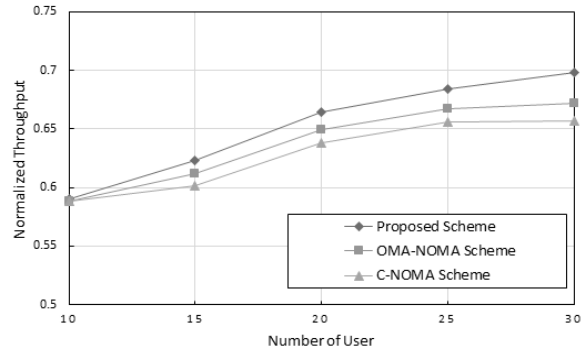


Fig. 4. Normalized Throughput Over Number of User

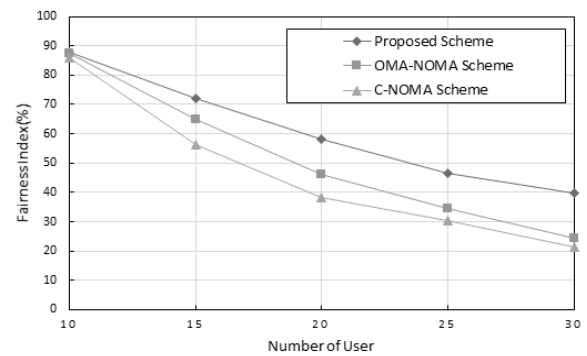


Fig. 5. Fairness Index Over Number of User

보다 낮은 처리량을 보인다.

Fig. 5는 사용자 수에 따른 공정성 지수를 보여준다. 공정성 지수는 Jain's Fairness Index를 사용한다[14]. Jain's Fairness Index는 다음 Equation (13)과 같이 정의된다[14].

$$F(x_1, x_2, \dots, x_n) = \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (13)$$

여기서, x_1, x_2, \dots, x_n 는 사용자가 받은 처리량이다. n 은 전체 사용자의 수이다. 즉, 전체 사용자가 받은 통신의 처리량이 얼마나 공정한지 나타낼 수 있는 지수이다. 공정성 지수가 기법에 상관 없이 사용자 수가 증가하면 낮아지는 이유는 기지국의 자원이 한정적이기 때문이다. 한정적인 자원에서 사용자 수가 증가할수록 서비스를 받지 못하는 사용자가 생김으로 발생하는 현상이다. 처리량과 유사하게 사용자의 수가 적을 경우 거짓말과 상관 없이 주파수가 균일하게 분배되어 모든 사용자가 공정하게 통신을 할 수 있다. 하지만, 사용자의 수가 증가할수록 VCG 메커니즘을 사용하지 않을 경우 전체 사용자에 대한 공정성 지수가 더욱 낮아지는 것을 확인할 수 있다. VCG 메커니즘을 사용할 경우 공정성 지수가 다른 기법에 비해 큰 폭으로 줄어드는 것을 막을 수 있다. 이것은 VCG 메커니즘을 사용할 경우 통신이 공정하게 분배되고 있음을 보여준다. 거짓말을 해서 낮은 이득을 가질 수 있는 중

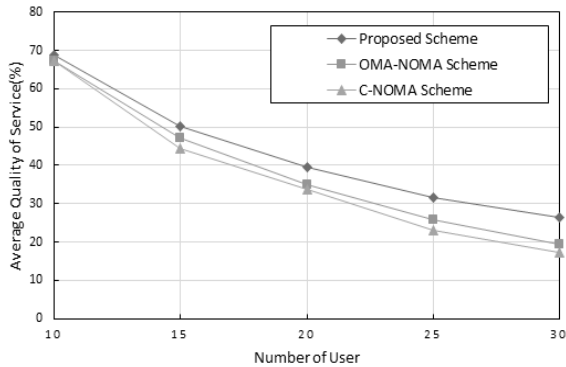


Fig. 6. Average QoS Over Number of User

계 노드가 주파수를 많이 가져오게 되고 이에 따라서 공정성 지수가 낮아지는 것으로 보인다.

Fig. 6은 사용자 수에 따른 평균 QoS를 보여준다. 평균 QoS는 통신 실험 상황이 끝난 뒤 모든 사용자들이 받은 QoS의 평균을 나타낸다. 공정성 지수와 마찬가지로 기지국이 한정적인 자원을 가지고 있기 때문에 사용자 수가 증가할수록 낮아지는 모습을 보인다. 사용자 수가 증가하면서 원하는 처리량을 보장해 주기 위해서는 자원이 많이 필요하게 되기 때문이다. 공정성 지수와 유사하게 사용자 수가 적을 때에는 거짓말의 유무가 큰 차이를 보이지 못하지만, 사용자 수가 증가할수록 거짓말을 할 경우 더 큰 폭으로 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 이에 따라서 VCG 메커니즘을 적용한 기법이 한정된 자원 내에서 QoS를 더욱 보장하며 효율적인 통신을 할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.

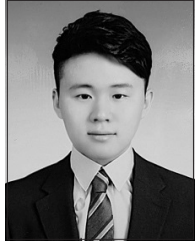
5. 결론

5G 네트워크의 높아진 트래픽 요구량을 처리하기 위해 등장한 NOMA 기술은 여러 사용자를 주파수가 아닌 전력을 차등 분배해 구분하면서 OFDMA보다 더 높은 처리량을 얻을 수 있다. 하지만, 전력을 이용해 여러 사용자를 구분하기 때문에 사용자가 거리가 멀면 높은 전력을 할당해야 한다. 이러한 단점을 보완하기 위해 협력 NOMA가 제안되었다. 협력 NOMA에서는 중계 노드를 사용하여 사용자와의 거리를 가깝게 하여 통신한다. 협력 NOMA를 더욱 개선하기 위해 다양한 기법이 제안되었지만 본 논문에서는 거짓된 보고를 통한 주파수 할당을 방지하기 위하여 메커니즘 디자인 중 VCG 메커니즘을 사용하여 중계 노드들이 진실한 보고를 유도하는 인센티브 기반 주파수 할당 기법을 제안하였다. 따라서, 중계 노드들은 모두 진실한 보고를 하게 되고 진실한 보고를 바탕으로 주파수를 할당해주면서 전체 통신 성능을 높일 수 있었다. 제안한 기법은 협력 NOMA 네트워크에서 중계 노드의 참여를 높이고 강력한 규제 없이 메커니즘 디자인으로 설계된 환경으로 중계 노드의 거짓 행동을 억제하고 더 높은 효율을 얻을 수 있다는 것을 시뮬레이션을 통하여 보였다.

References

- [1] J. G. Andrews et al., "What Will 5G Be?," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol.32, No.6, pp.1065-1082, 2014.
- [2] I. Koffman and V. Roman, "Broadband wireless access solutions based on OFDM access in IEEE 802.16," *IEEE Communications Magazine*, Vol.40, No.4, pp.96-103, 2002.
- [3] L. Dai, B. Wang, Y. Yuan, S. Han, C. I, and Z. Wang, "Non-orthogonal multiple access for 5G: solutions, challenges, opportunities, and future research trends," *IEEE Communications Magazine*, Vol.53, No.9, pp.74-81, 2015.
- [4] Y. Saito, Y. Kishiyama, A. Benjebbour, T. Nakamura, A. Li, and K. Higuchi, "Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) for Cellular Future Radio Access," *2013 IEEE 77th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, Dresden, pp.1-5, 2013.
- [5] H. Hacı and H. Zhu, "Performance of non-orthogonal multiple access with a novel interference cancellation method," *2015 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, London, pp.2912-2917, 2015.
- [6] M. Zeng, W. Hao, O. A. Dobre, and Z. Ding, "Cooperative NOMA: State of the Art, Key Techniques, and Open Challenges," *IEEE Network*, Vol.34, No.5, pp.205-211, 2020.
- [7] L. Hurwicz, and S. Reiter, "Designing Economic Mechanisms," Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2006.
- [8] A. Karlin, and Y. Peres, "Game Theory, Alive," U.S.A: American Mathematical Society, 2017.
- [9] Z. Ding, Z. Yang, P. Fan, and H. V. Poor, "On the Performance of Non-Orthogonal Multiple Access in 5G Systems with Randomly Deployed Users," *IEEE Signal Processing Letters*, Vol.21, No.12, pp.1501-1505, 2014.
- [10] Z. Ding, H. Dai, and H. V. Poor, "Relay Selection for Cooperative NOMA," *IEEE Wireless Communications Letters*, Vol.5, No.4, pp.416-419, 2016.
- [11] M. Hadi and R. Ghazizadeh, "Resource Allocation in OMA-NOMA based Two-Tier Heterogeneous Networks," *2020 8th Iranian Joint Congress on Fuzzy and intelligent Systems (CFIS)*, Mashhad, Iran, pp.1-6, 2020.
- [12] M. A. Khan, S. Pal, and A. Jose, "BER Performance of BPSK, QPSK & 16 QAM with and without using OFDM over AWGN, Rayleigh and Rician Fading Channel," *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, Vol.4, pp.64-69, 2015.
- [13] M. S. Ali, H. Tabassum, and E. Hossain, "Dynamic User Clustering and Power Allocation for Uplink and Downlink Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) Systems," *IEEE Access*, Vol.4, pp.6325-6343, 2016.

- [14] R. Jain, W. Hawe, and D. Chiu, "A Quantitative measure of fairness and discrimination for resource allocation in Shared Computer Systems," DEC-TR-301, 1984.



김 종 원

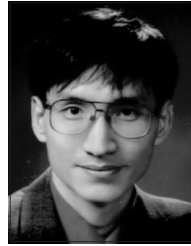
<https://orcid.org/0000-0002-8600-3645>

e-mail : kjo26619@naver.com

2019년 동양미래대학교 정보통신공학과
(학사)

2019년 ~ 현 재 서강대학교 컴퓨터공학과
석사과정

관심분야 : Mechanism Design & Network Resource Allocation



김 승 욱

<https://orcid.org/0000-0003-1967-151X>

e-mail : swkim01@sogang.ac.kr

1993년 서강대학교 전자(학사)

1995년 서강대학교 전자(석사)

2003년 Syracuse University,
Computer Science(박사)

2005년 중앙대학교 컴퓨터공학부 조교수

2006년 ~ 현 재 서강대학교 컴퓨터공학과 교수

관심분야 : Network Resource Allocation using Game
Theory