

<https://doi.org/10.7236/IIBC.2017.17.5.35>

IIBC 2017-5-5

# SIC 에러가 협동 NOMA 시스템에 미치는 영향

## Effect of SIC Errors to Cooperative NOMA systems

김남수\*

Nam-Soo Kim\*

**요 약** NOMA (Non-orthogonal multiple access) 시스템은 5세대 이동통신 시스템에서 요구하는 스펙트럼 효율과 시스템 성능을 만족시키는 유력한 다중화 기술이다. NOMA 시스템은 전력 도메인에서 여러 사용자를 동시에 전송하는데, 타 사용자들로 부터의 간섭을 제거하기 위하여 수신기에 SIC (Successive interference cancellation)를 채택하고 있다. 그러나 현실적으로 무선 페이딩 채널의 특성상 완벽한 SIC가 불가능하므로, SIC 에러가 NOMA 시스템에 미치는 영향에 대한 연구는 매우 필요하다. 본 논문에서는 SIC 에러가 존재할 때 협동 NOMA 시스템을 대상으로 하여 시스템의 오수신율을 해석적으로 유도하였고, 오수신율을 최소화하기 위한 최적의 전력할당을 구하였다. 또한 송신전력이 고정되었을 경우 SIC 에러에 따른 기지국과 릴레이 사이의 거리도 검토하였다. 유도한 결과는 Monte Carlo 시뮬레이션 결과와 비교하여 정확히 일치함을 확인하였다.

**Abstract** NOMA (Non-orthogonal multiple access) system is the most promising multiple access technology to satisfy the requirements of the spectral efficiency and the performance of 5G cellular systems. NOMA system simultaneously serves multiple users in the power domain, and adapts SIC (Successive interference cancellation) at the receivers to cancel the interference from multiple users. Since in a realistic wireless fading channel the perfect SIC is impossible, the study of the effect of the imperfect SIC to a NOMA system is necessary. This paper considers a cooperative NOMA system with SIC error, and the performance of the system is analytically derived. And the optimum power allocation to minimize the system performance is obtained. When the transmit power is fixed, the distances between a base station and the relay is considered for different SIC errors. The derived analytical results are verified through Monte Carlo simulation, and the results are perfectly matched.

**Key Words** : Cooperative NOMA, SIC Error, Pairing, User Relay

### 1. 서 론

이동통신의 발전과 더불어 기존 4세대에서 사용되던 OMA(Orthogonal multiple access) 방식은 5세대 이동통신 방식에서 요구하는 채널 전송용량의 획기적 증가와 고속의 데이터 전송을 수용하기에는 한계에 도달하였다.

이러한 한계를 극복하기 위하여 동일한 주파수로 여러 사용자의 정보를 동시에 전송하는 NOMA (None-orthogonal multiple access) 방식이 5세대 다중화 방식으로 주목받게 되었다. 그리고 다중화된 사용자 사이의 간섭을 제거하여 시스템의 성능을 개선하기 위하여 연속 간섭 제거 (Successive interference cancellation, 이

\*정회원, 청주대학교 전자공학과  
접수일자: 2017년 8월 22일, 수정완료: 2017년 10월 9일  
게재확정일자: 2017년 10월 13일

Received: 22 August, 2017 / Revised: 9 October, 2017

Accepted: 13 October, 2017

\*Corresponding Author: nskim@cju.ac.kr

Dept. of Electronic Engineering, Cheongju University, Korea

하 SIC)를 도입하였다[1]~[4].

그 동안 SIC를 사용한 NOMA 방식은 주로 타 사용자로부터의 간섭을 완벽히 제거한다고 가정하여 시스템의 성능을 유도하였다. 그러나 무선 채널에서는 깊고 빠른 페이딩, 채널정보의 지연, 그리고 피드백 에러 등으로 완벽한 SIC가 현실적으로 매우 어렵기 때문에 SIC후에 출력되는 신호에는 다소의 간섭 성분이 존재하게 되고, 결국 신호 대 간섭 더하기 잡음(Signal-to-interference plus noise ration, 이하 SINR)이 나빠지며, 시스템의 성능을 저하시킨다.

불완전 SIC를 해석한 연구로는 2007년 Weber 등은 애드혹 네트워크에서 불완전 SIC가 존재할 때 전송용량을 해석하였고[5], NOMA 시스템에 대해서는 2016년 MIMO (Multiple-input-multiple-output)를 채택한 NOMA 시스템에서 SIC 에러에 의한 영향을 분석하였다[6].

한편 협동 NOMA 시스템은 NOMA 시스템의 성능을 향상시키기 위하여 도입되었는데, 릴레이로 사용하는 방식에 따라서 첫째로 전용 릴레이 방식[7],[8]과 사용자 릴레이 방식[9],[10]으로 나눌 수 있다.

[11]은 2개의 전용 릴레이를 사용하여 2개의 사용자에게 정보를 전송하는 협동 NOMA 시스템에서 SIC 에러가 존재할 때 시스템의 성능을 분석하였다. NOMA 시스템에서는 간섭신호를 제거하기 위하여 SIC 과정에서 타 사용자의 정보를 복조하는데, 이 때 복조한 정보는 타 사용자에게 전송해 주는 릴레이 정보로 사용할 수 있다. 이 경우에는 전용 릴레이가 아니라 사용자 릴레이 방식이 된다. 사용자 릴레이 방식은 별도의 전용 릴레이가 필요하지 않게 되므로 임시적인 네트워크를 형성하는 애드혹 네트워크 등에 적용이 가능한 매우 유용한 방식이다.

따라서 이 논문에서는 SIC 에러가 존재할 때 사용자 릴레이 방식을 채택하는 협동 NOMA 시스템을 대상으로 하여 시스템 오수신율을 유도하였고, 시스템의 오수신율을 최소화 할 수 있는 최적의 전력할당 계수를 유도하였다. 이론적으로 유도한 결과는 타당성을 검증하기 위하여 Monte Carlo 시뮬레이션 결과와 비교하였고, 서로 정확히 일치함을 확인하였다. 또한 송신전력이 고정되었을 경우 SIC 에러에 따른 최적의 전력할당 값과 기지국과 릴레이 사이의 거리도 검토하였다.

본 논문의 구성은 제2장에서 SIC가 존재하는 NOMA 시스템 모델과 통신 프로토콜을 설명하였고, 제3장에서 SIC 에러가 있을 때 오수신율을 유도하였다. 그리고 제4

장에서 수치적인 예를 들어 유도한 결과와 시뮬레이션 결과를 비교하였다. 제5장에서 SIC 에러에 의한 릴레이 선택 반응을 서술하고, 마지막으로 제6장에서 본 논문의 결론을 서술하였다.

## II. 시스템 모델

이 장에서는 먼저 협동 NOMA 시스템과 불완전 SIC 모델에 대해서 서술하고, 다음으로 통신 프로토콜을 설명한다.

### 1. 시스템 및 불완전 SIC 모델

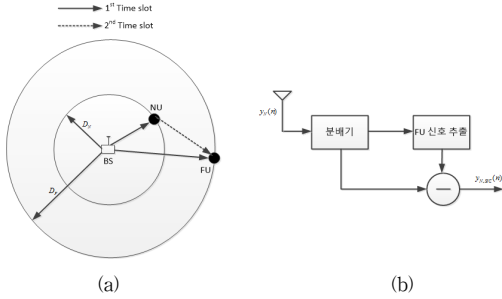
그림1은 이 논문에서 고려하고자 하는 협동 NOMA 시스템 모델이다. 이 그림에서 BS는 기지국을 나타내고, NU (Near user)는 근거리 사용자, 그리고 FU (Far user)는 원거리 사용자를 나타낸다. 기지국과 근거리 사용자 및 원거리 사용자가 떨어진 거리는 각각  $D_N$  및  $D_F$  라고 하자. NOMA 시스템 내에 여러 개의 사용자가 존재하지만, 페어링을 통하여 근거리 사용자와 원거리 사용자가 결정되었다고 가정한다.

그림1(a)에서 실선은 첫 번째 타임슬롯에서 기지국이 NOMA 사용자들에게 신호를 송신하고, 근거리 사용자 및 원거리 사용자가 수신하는 경우이다. 그리고 점선은 두 번째 타임슬롯을 나타내며, 이때에는 근거리 사용자가 원거리 사용자에게 정보를 전송하고 원거리 사용자는 근거리 사용자 및 기지국으로부터 받은 신호를 결합하는 단계를 나타낸다.

무선채널을 통하여 전송된 신호는 서로 독립인 레일리 페이딩을 받고, 수신된 전력은 거리의  $\delta$ 에 반비례한다고 가정하자;  $P_r = P_T d^{-\delta}$ . 여기서  $P_r$  및  $P_T$ 는 각각 수신전력 및 송신전력,  $d$ 는 송수신기 간에 떨어진 거리를 나타내며, 그리고  $\delta$ 는 전파감쇄 계수로써 무선 채널에서 일반적으로 3 ~ 5 사이의 값을 갖는다[12], [13].

한편 그림1(b)는 근거리 사용자에서 일어나는 SIC 과정을 나타내는데, 근거리 사용자가 수신한 신호로부터 원거리 사용자 신호를 추출한 후 수신 신호에서 제거해주는 역할을 한다. 만일 SIC과정이 완벽하다면 간섭인 원거리 사용자의 신호를 모두 제거할 수 있지만, 현실적으로 깊고 빠른 페이딩, 채널정보의 지연, 그리고 피드백 에러 등으로 완벽한 SIC가 매우 어렵기 때문에 SIC후에

다소의 간섭성분이 존재하게 되고, 결국 신호 대 간섭 더하기 잡음(Signal-to-interference plus noise ration, 이하 SINR)이 나빠지며, 시스템의 성능을 저하시킨다.



(a) Cooperative system model (b) SIC processing at near user

그림 1. 협동 NOMA 시스템 모델  
 Fig. 1. Cooperative NOMA system model

## 2. 전송 프로토콜

### 가. 첫 번째 타임슬롯; 방송단계

첫 번째 타임슬롯에서는 기지국이 NOMA 프로토콜에 의하여 근거리 사용자와 원거리 사용자의 정보를 전력 다중화하여 송신하며, 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$s(n) = \sqrt{\alpha_N P_s} x_N(n) + \sqrt{\alpha_F P_s} x_F(n) \quad (1)$$

여기서  $\alpha_N$  및  $\alpha_F$ 는 각각 근거리 사용자 및 원거리 사용자의 전력할당계수인데,  $\alpha_N + \alpha_F = 1$ 이다.  $P_s$ 는 기지국의 송신전력이며,  $x_N(n)$  및  $x_F(n)$ 는 각각 근거리 및 원거리 사용자의 정보이다. 그리고  $x_N(n)$  및  $x_F(n)$ 는 이진 정보를 갖고,  $|x_N(n)|^2 = |x_F(n)|^2 = 1$ 이다. 기지국에서 전송한 신호는 무선채널을 통한 후 근거리 사용자 및 원거리 사용자에게 수신된다(그림1의 실선 화살표). 근거리 사용자는 SIC 과정을 통하여 정보를 추출하는데, 그 과정을 그림1(b)에 나타내었다. 근거리 사용자에게 수신된 신호는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$y_N(n) = \sqrt{\alpha_N P_{SN}} x_N(n) h_{SN}(n) + \sqrt{\alpha_F P_{SN}} x_F(n) h_{SN}(n) + n_N(n) \quad (2)$$

여기서  $h_{SN}(n)$ 는 소스인 기지국과 근거리 사용자 사이의 채널이었는데, 평균이 0이고, 분산이 1인 복소 가우시안 분포  $CM(0, 1)$ 를 갖는다.  $P_{SN}$ 은 근거리 사용자가 수신한

전력인데,  $P_{SN} = P_s D \frac{\delta}{N}$ 이다. 그리고  $n_N(n)$ 는 근거리 사용자의 잡음인데, 평균이 0이고 분산이  $N_0$ 인 가우시안 분포  $N(0, N_0)$ 를 갖는다.

근거리 사용자는 먼저 원거리 사용자의 정보를 추출하는데, 근거리 사용자가 원거리 사용자의 정보  $x_F(n)$ 를 추출할 때의 SINR은 (2)로부터 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\gamma \frac{x_F}{N} = \frac{\alpha_F P_{SN} |h_{SN}(n)|^2}{\alpha_N P_{SN} |h_{SN}(n)|^2 + N_0} \quad (3)$$

그리고 그림1(b)와 같은 SIC과정을 거쳐서 근거리 사용자의 정보를 추출한다. 일반적으로 대부분의 NOMA 논문들은 완벽한 SIC를 가정하였으나, 앞에서 언급한 바와 같이 SIC 과정의 불완전성으로 원거리 사용자의 정보를 완벽히 제거할 수 없게 된다. 따라서 불완전 SIC 후의 신호는

$$y_{N, SIC}(n) = \sqrt{\alpha_N P_{SN}} h_{SN}(n) x_N(n) + \sqrt{\beta \alpha_F P_{SN}} h_{SN}(n) x_F(n) + n_N(n) \quad (4)$$

이 된다. 여기서  $0 \leq \beta \leq 1$ 인데,  $\beta$ 를 SIC 에러 계수라고 하자. 이는 SIC의 불완전성으로 인하여 발생되며, 만일  $\beta = 0$ 이면 완전한 SIC가 되고  $\beta = 1$ 은 SIC를 적용하지 않은 경우의 수신신호가 된다. 따라서 근거리 사용자가 자신의 정보  $x_N(n)$ 을 추출할 때의 SINR은 (4)로부터 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\gamma \frac{x_N}{N} = \frac{\alpha_N P_{SN} |h_{SN}(n)|^2}{\beta \alpha_F P_{SN} |h_{SN}(n)|^2 + N_0} \quad (5)$$

만일 완벽한 SIC라면 (5)는  $\gamma \frac{x_N}{N} = \alpha_N P_{SN} |h_{SN}(n)|^2 / N_0$ 가 된다.

### 나. 두 번째 타임슬롯; 릴레이 및 결합단계

두 번째 타임슬롯에서는 근거리 사용자가 추출한 원거리 사용자의 정보를 원거리 사용자에게 전송한다. 이때 원거리 사용자가 수신한 신호는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$y_F(n) = \sqrt{\alpha_F P_{NF}} h_{NF}(n) x_F + n_F(n) \quad (6)$$

여기서  $P_{NF}$ 은 원거리 사용자가 근거리 사용자로부터 수신한 수신전력이고,  $h_{NF}(n)$ 는 근거리-원거리 사용자 채널이득인데, 평균이 0이고 분산 1인 복소 가우시안 분포  $\mathcal{CN}(0, 1)$ 를 갖는다. 그리고  $n_F(n)$ 는 원거리 사용자의 잡음인데, 평균이 0이고 분산이  $N_0$ 를 갖는 가우시안 분포  $\mathcal{N}(0, N_0)$ 를 갖는다. 그러므로 원거리 사용자가 수신한 신호 대 잡음비(Signal-to-noise ratio, 이하 SNR)는 다음과 같이 쓸 수 있다

$$\gamma_{F^*} = \frac{\alpha_F P_{NF} |h_{NF}(n)|^2}{N_0} \quad (7)$$

또한 원거리 사용자는 기지국으로부터 직접 경로를 통해서도 신호를 수신하므로, 직접경로를 통해서 수신된 신호는 다음과 같다.

$$y_{dir}(n) = \sqrt{\alpha_N P_{SF}} x_N(n) h_{SF}(n) + \sqrt{\alpha_F P_{SF}} x_F(n) h_{SF}(n) + n_F(n) \quad (8)$$

여기서  $h_{SF}(n)$ 는 직접경로의 채널이득이고  $\mathcal{CN}(0, 1)$ 이고,  $P_{SF} = P_S D^{-\delta}$ 이다. 그러므로 직접경로를 통하여 원거리 사용자에게 수신된 SINR은 다음과 같다.

$$\gamma_{SF} = \frac{\alpha_F P_{SF} |h_{SF}(n)|^2}{\alpha_S P_{SF} |h_{SF}(n)|^2 + N_0} \quad (9)$$

그리고 원거리 사용자는 공간다이버시티 이득을 위하여 근거리 사용자로부터 수신한 신호와 기지국으로부터 수신한 신호를 선택결합한다.

### III. SIC 에러에 의한 오수신율의 영향

먼저 근거리 사용자는 원거리 사용자 정보를 추출한 후 근거리 사용자 정보를 복조하기 때문에 오수신이 발생할 경우는 다음과 같다; 첫째로 원거리 사용자의 정보를 추출하지 못한 경우, 둘째로 원거리 사용자 정보는 추출하였는데 근거리 사용자 정보를 추출하지 못한 경우이

다.

불완전 SIC의 경우에도 근거리 사용자에게 수신된 SINR 값만 차이가 있고 오수신율을 유도하는 과정은 [14]와 동일하지만, 이 절에서는 수치적인 값의 차이가 있으므로 오수신 유도과정을 간략히 서술한다. 오수신은 수신된 SINR이 임계값보다 작은 경우 발생된다고 정의하면 근거리 사용자의 오수신율은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P_{o,N} = \Pr(\gamma_{NF}^{x_F} < \Gamma_F) + \Pr(\gamma_{NF}^{x_F} \geq \Gamma_F, \gamma_{NF}^{x_N} < \Gamma_N) \quad (10)$$

여기서  $\Gamma_F$  및  $\Gamma_N$ 은 각각 원거리 임계값과 근거리 임계값인데,  $\Gamma_F = 2^{2R_F} - 1$ 이고  $\Gamma_N = 2^{2R_N} - 1$ 이다. 그리고 세논의 채널용량은

$$R = \log_2(1 + \gamma) \quad (11)$$

이며, 여기서  $\gamma$ 는 채널의 SNR 또는 SINR이다. 그리고  $R$ 의 단위는 bps/Hz이다. 그러므로 근거리 사용자의 Quality of Service (QoS)를 만족시키기 위해서는  $R \geq R_N$ 을 만족하면 되고, 이때 최소의 전송용량을 만족시키는 근거리 사용자의 SINR의 임계값이  $\Gamma_N$ 이다. 한편 원거리 사용자는 2개의 타임슬롯이 필요하므로  $R \geq 2R_F$ 일 때 원거리 사용자의 QoS를 만족시킬 수 있는데, 따라서 원거리 사용자의 SINR 임계값이  $\Gamma_F$ 이다.

(3)과 (5)를 (10)에 대입하면, (10)의 첫 번째 확률은

$$\begin{aligned} \Pr(\gamma_{NF}^{x_F} < \Gamma_F) &= \Pr\left(\frac{\alpha_F P_{SF} |h_{SF}(n)|^2}{\alpha_N P_{SN} |h_{SN}(n)|^2 + N_0} < \Gamma_F\right) \\ &= \Pr(|h_{SN}(n)|^2 < \zeta), \quad \Gamma_F < \frac{\alpha_F}{\alpha_N} \end{aligned} \quad (12)$$

이 되고, 여기서  $\zeta = \Gamma_F / \rho_{SN} (\alpha_F - \Gamma_F \alpha_N)$ 이고,  $\rho_{SN} = P_{SN} / N_0$ 이다. 그리고 두 번째 확률 식 중에서

$$\begin{aligned} \Pr(\gamma_{NF}^{x_N} < \Gamma_N) &= \Pr\left(\frac{\alpha_N P_{SN} |h_{SN}(n)|^2}{\beta \alpha_F P_{SN} |h_{SN}(n)|^2 + N_0} < \Gamma_N\right) \\ &= \Pr(|h_{SN}(n)|^2 < \eta), \quad \Gamma_N < \frac{\alpha_N}{\beta \alpha_F} \end{aligned} \quad (13)$$

가 된다. 여기서  $\eta = \Gamma_N / \rho_{SN}(\alpha_N - \Gamma_N \beta \alpha_F)$  이다. (13)에  
 서 SIC가 완벽한 경우에는  $\beta = 0$ 이 되므로 분모항이  $N_0$   
 가 되고, 임계값  $\Gamma_N$ 에 대한 조건이 없어진다는 점을 주목  
 하자. (12)와 (13)을 (10)에 대입하면,

$$P_{oN} = \Pr\left(|h_{SN}(n)|^2 < \zeta\right) + \Pr\left(|h_{SN}(n)|^2 \geq \zeta, |h_{SN}(n)|^2 < \eta\right) \quad (14)$$

가 되므로,

$$P_{oN} = \Pr\left(|h_{SN}(n)|^2 < \max(\zeta, \eta)\right) = 1 - e^{-\max(\zeta, \eta)} \quad (15)$$

이 된다. 여기서 두 번째 등호는 레일레이 페이딩을 가정  
 하였다.

그리고 원거리 사용자는 간접경로와 직접 경로로 수  
 신된 신호를 선택결합하므로, 오수신율은 간접경로의 오  
 수신율과 직접 경로의 오수신율의 곱으로 구할 수 있다  
 [12],[14].

$$P_{oF} = P_{o,dir} \times P_{o,ind} \quad (16)$$

수식유도는 [14]를 참고하여 결론만 서술하면,

$$P_{o,ind} = \Pr\left\{\min\left(\gamma_{NF}^{x_F}, \gamma_{FF}^{x_F}\right) < \Gamma_F\right\} = 1 - e^{-(\lambda + \zeta)} \quad (17)$$

여기서  $\lambda = \Gamma_F / \rho_{NF} \alpha_F$  이고,  $\rho_{NF} = P_{NF} / N_0$ ,  $P_{NF}$ 은 근거  
 리 사용자로부터 수신한 원거리 사용자의 수신 전력이다.  
 한편

$$P_{o,dir} = \Pr\left(\gamma_{SF}^{x_F} < \Gamma_F\right) = 1 - e^{-\chi} \quad (18)$$

여기서  $\chi = \Gamma_F / \rho_{SF}(\alpha_F - \alpha_N \Gamma_F)$ 이다.  $\rho_{SF} = P_{SF} / N_0$  인데,  
 여기서  $P_{SF}$ 는 기지국으로부터 수신한 원거리 사용자의  
 수신 전력이다. 따라서 선택 결합을 갖는 원거리 사용자  
 의 오수신율은

$$P_{oF} = \{1 - e^{-(\lambda + \zeta)}\}(1 - e^{-\chi}) \quad (19)$$

가 된다.

협동 NOMA 시스템이 성공적으로 수신할 확률을 근  
 거리 사용자 및 원거리 사용자가 모두 성공적으로 수신  
 할 확률로 정의하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P_{success} = (1 - P_{oN})(1 - P_{oF}) \quad (20)$$

따라서 (15)와 (19)로 부터 시스템의 오수신율은 다음  
 과 같이 쓸 수 있다.

$$P_{out} = 1 - P_{success} = 1 - e^{-\max(\zeta, \eta)} [1 - \{1 - e^{-(\lambda + \zeta)}\}(1 - e^{-\chi})] \quad (21)$$

#### IV. SIC 에러에 의한 릴레이 선택 반경

시스템 오수신율을 나타낸 (21)은 근거리 사용자의 오  
 수신율에 영향을 많이 받는다[14]. 그러므로 시스템의 오  
 수신율을 최소화하기 위한 최적의 전력할당을 위해서  
 $\zeta = \eta$  인 전력할당 계수를 구하면 된다. 이때의 최적의  
 원거리 전력할당계수  $\alpha_{F-opt}$  는

$$\alpha_{F-opt} = \frac{\Gamma_F(1 + \Gamma_N)}{\Gamma_N + \Gamma_F\{1 + \Gamma_N(1 + \beta)\}} \quad (22)$$

가 된다.

송수신기 사이의 거리가 짧을수록 평균 수신전력이  
 커지므로 기지국, 근거리 및 원거리 사용자가 일직선상  
 에 놓여있을 때 떨어진 거리가 가장 짧다. 그림2와 같이  
 근거리 및 원거리 사용자가 기지국과 일직선상에 놓여있  
 다고 가정하자. 여기서 근거리 사용자 및 원거리 사용자  
 의 이격거리  $d_N$  및  $d_F$ 는 각각 기지국-원거리 사용자 사  
 이의 거리  $D_F$ 로 정규화한 값이다;  $d_N = D_N / D_F$  및  
 $d_F = D_N / D_N$ .

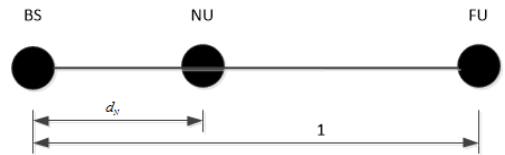


그림 2. 근거리 및 원거리 사용자 거리  
 Fig. 2. Distances to near user and far user

## V. 수치적인 예

그림3은 SIC 에러 계수  $\beta$ 가 0.05일 때의 근거리 및 원거리 사용자, 그리고 시스템의 오수신율을 나타낸 것이다. 이 그림에서 보는 바와같이 근거리 사용자의 오수신율은 원거리 사용자의 전력 할당 계수에 따라서 Convex 함수가 되는데, 이는 (15)에서 유도한 바와 같이  $\alpha_F$ 가 증가하면  $\exp(-\max(\zeta, \eta))$  값이 증가했다가  $\zeta = \eta$  인 이후에는 감소하기 때문이다.

한편 원거리 사용자는  $\alpha_F$ 가 증가하면 수신전력도 증가하기 때문에 오수신율이 감소한다. 또한 이 그림에서  $\alpha_F$ 가 0.95보다 미소하게 증가하면 오수신율이 1이 되는 것은 NOMA 시스템의 조건인  $\Gamma_F < \alpha_F/\alpha_N$  및  $\Gamma_N < \alpha_N/\beta\alpha_F$  을 만족시키지 못하기 때문이다.

그리고 이 그림에서 보는 바와 같이 협동 NOMA 시스템의 오수신율은 근거리 사용자 오수신율의 영향을 가장 크게 받는다.

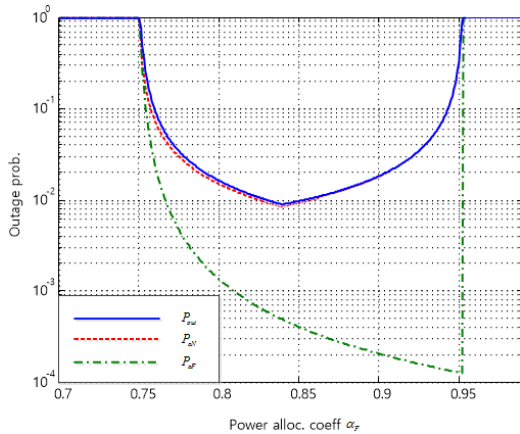


그림 3. 시스템, 근거리 사용자 및 원거리 사용자의 오수신율 ( $R_N = R_F = 1 \text{ bps/Hz}$ ,  $\rho_{SN} = \rho_{NF} = 30 \text{ dB}$ ,  $\rho_{SF} = 0.2\rho_{SN}$ ,  $\beta = 0.05$ )

Fig. 3. Outage probability of system, near user and far user

$$(R_N = R_F = 1 \text{ bps/Hz}, \rho_{SN} = \rho_{NF} = 30 \text{ dB}, \rho_{SF} = 0.2\rho_{SN}, \beta = 0.05)$$

그림4는 전력할당 계수 및 SIC 에러 계수  $\beta$ 에 따른 시스템 오수신율의 변화를 나타내고 있다. 이 그림에서 \*는 Monte Carlo 시뮬레이션 결과를 나타내었는데,  $1 \times 10^6$  반복하여 평균을 낸 값이다. 시뮬레이션 결과는 이론적으로 유도한 결과와 정확히 일치하고 있으며, 따라서 이

론적으로 유도한 결과의 타당성을 입증하고 있다.

이 그림에서 보는 바와 같이 SIC 에러가 증가할수록 오수신율은 증가하고 있는데, 이는 SIC 에러가 증가하면 근거리 사용자에게 수신되는 SINR 이 작아지고 결국 오수신율이 증가하기 때문으로 해석된다. 또한 이 그림에서 SIC 에러가 증가할수록 시스템 오수신율을 줄이기 위한 원거리 사용자의 할당전력이 작아지는 것을 볼 수 있는데, 이는 근거리 사용자의 오수신율이 시스템 전체에 미치는 영향이 크기 때문에 근거리 사용자의 오수신율을 경감시키기 위해서 근거리 사용자에게 할당되는 전력을 증가해야하기 때문이다.

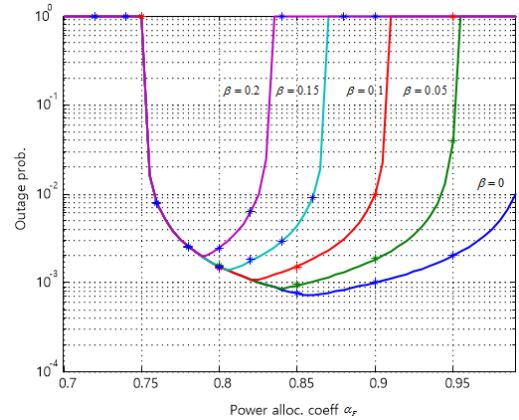


그림 4. SIC 에러 및 전력할당에 따른 시스템 오수신율

$$(R_N = R_F = 1 \text{ bps/Hz}, \rho_{SN} = \rho_{NF} = 40 \text{ dB}, \rho_{SF} = 0.2\rho_{SN})$$

Fig. 4. Outage probability for different SIC errors and power allocations

$$(R_N = R_F = 1 \text{ bps/Hz}, \rho_{SN} = \rho_{NF} = 40 \text{ dB}, \rho_{SF} = 0.2\rho_{SN})$$

그림5는 시스템의 오수신율을 최소화하는 최적의 전력할당 계수  $\alpha_F$ 를 나타낸 것인데, SIC 에러 계수가 증가할수록  $\alpha_F$  값이 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 그림4의 결과와 동일한 맥락이다. 그리고 원거리 사용자가 요구하는 채널용량이 증가할수록  $\alpha_F$  는 증가하는데, 이는 채널용량이 증가하면 요구하는 SNR이 증가하고 결국 수신전력이 증가해야하기 때문이다.

또한 SIC 에러 계수가 0에서 1로 증가한다는 것은 완벽한 SIC에서 전혀 SIC를 하지 않은 경우를 의미하는데, 이 경우 시스템 전체의 오수신율을 줄이기 위해서  $\alpha_F$ 가 점차 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 시스템의 오수신율을 최소화하기 위해서 근거리 사용자의 전력할당을 점진적으로 증가시켜 주어야 한다는 것을 의미한다.

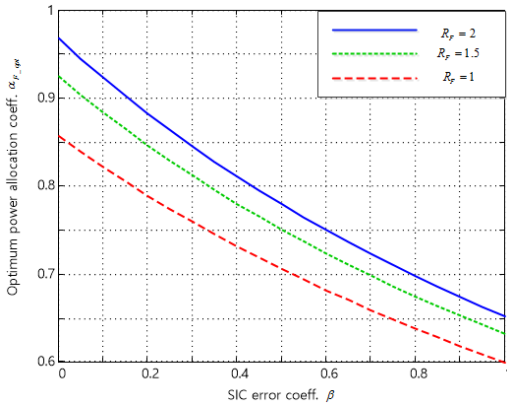


그림 5. SIC 에러 계수와 최적 전력할당계수 ( $R_N = 1 \text{bps/Hz}$ )

Fig. 5. SIC error coefficients vs. optimal power allocation coefficients ( $R_N = 1 \text{bps/Hz}$ )

그림6은 SIC 에러가 존재할 때 근거리 사용자의 위치에 따른 시스템 오수신율의 변화를 나타내고 있다. 여기서 기지국과 근거리 사용자가 사이의 거리는 그림2에서 정의한 바 와 같이 정규화한 거리이므로, 근거리 사용자는 기지국에 근접할수록, 그리고 근거리 사용자와 원거리 사용자의 거리가 멀수록 시스템 성능이 개선됨을 알 수 있다. 이는 [10]에서 릴레이의 위치에 따른 성능변화를 고찰할 때와 동일한 결과이다.

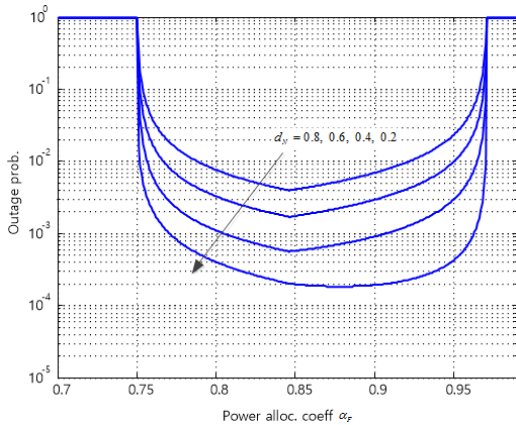


그림 6. 근거리 사용자의 위치에 따른 오수신율의 변화 ( $R_N = R_F = 1 \text{bps/Hz}$ ,  $P_S/N_0 = 30 \text{dB}$ ,  $P_N/N_0 = 20 \text{dB}$ ,  $\delta = 3$ ,  $\beta = 0.03$ )

Fig. 6. Outage probability for different distances of near user ( $R_N = R_F = 1 \text{bps/Hz}$ ,  $P_S/N_0 = 30 \text{dB}$ ,  $P_N/N_0 = 20 \text{dB}$ ,  $\delta = 3$ ,  $\beta = 0.03$ )

## VI. 결론

NOMA 시스템에서는 동일한 주파수를 사용하여 여러 사용자의 정보를 동시에 전송하기 때문에, 각 사용자 사이의 간섭을 SIC로 모두 제거해야 시스템의 성능을 최대화 할 수 있다. 그런데 무선채널의 빠른 페이딩, 채널정보의 지연, 그리고 피드백 에러 등으로 완벽한 SIC는 쉽지 않다.

따라서 본 논문에서는 협동 NOMA 시스템에서 SIC 에러가 존재할 때의 시스템에 미치는 영향을 이론적으로 유도하였다. 그리고 수식으로 유도한 결과는  $1 \times 10^6$  회의 Monte Carlo 시뮬레이션을 통하여 정확성을 입증하였다.

해석결과 SIC 에러가 증가할수록 오수신율은 증가하고 있는데, 이는 SIC 에러가 증가하면 근거리 사용자에게 수신되는 SINR이 작아지고 결국 오수신율이 증가하기 때문이다. 또한 SIC 에러가 증가할수록 시스템 오수신율을 최소화하기 위하여 원거리 사용자 할당전력 배분을 줄여야 한다는 결과를 얻었다. 이는 근거리 사용자의 오수신율이 시스템 전체에 미치는 영향이 크기 때문에 근거리 사용자의 오수신율을 경감시키기 위해서 근거리 사용자에게 할당되는 전력을 증가해야하기 때문이다.

그리고 원거리 사용자가 요구하는 전송용량이 감소하고, SIC 에러가 증가할수록 시스템의 오수신율을 최소화하기 위한 원거리 사용자의 전력할당을 줄여야한다는 결과를 얻었다. 또한 기지국 송신전력과 근거리 사용자 송신 전력이 주어졌을 때, 근거리 사용자와 원거리 사용자 사이의 거리가 멀수록 시스템의 성능은 개선되는 결과를 얻었다.

본 논문의 결과는 5G 협동 NOMA 시스템에서 SIC 에러가 있을 때 시스템의 성능을 향상시키기 위하여 최적의 전력할당 비를 결정하는 이론적인 근거로 활용이 가능할 것이다.

## References

[1] Y. Saito, Y. Kishyama, A. Benjebbour, T. Nakamura, A. Li, and K. Higuchi, "Non-orthogonal multiple access (NOMA) for cellular future radio access," Proceedings of Vehicular Tech. Conf.

- (VTC spring), pp.1-5, June 2013.
- [2] 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, Dec. 2014.
- [3] Y. Saito, A. Benjebbour, Y. Kishiyama, and T. Nakamura, "System-level performance evaluation of downlink non-orthogonal multiple access (NOMA)," *Proceedings of Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, Sep. 2013.
- [4] L. Dai, B. Wang, Y. Yuan, S. Han, C.-L. 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, Sep. 2015.
- [5] S. Weber, J. Andrews, X. Yang, and G. Veciana, "Transmission capacity of wireless Ad Hoc networks with successive interference cancellation," *IEEE Trans. on Information Theory*, vol. 53, no. 8, pp. 2799-2814, Aug. 2007.
- [6] H. Sun, B. Xie, R. Q. H, and G. Wu, "Non-orthogonal multiple access with SIC error propagation in downlink wireless MIMO networks," *Proceedings of VTC*, pp. 1-5, Sept. 2016.
- [7] Jinjin Men and Jianhua Ge, "Performance analysis of non-orthogonal multiple access in downlink cooperative network," *IET Communications*, vol. 9, no. 18, pp. 2267-2273, Dec. 2015.
- [8] Z. Ding, H. Dai, and H. V. Vincent, "Relay selection for cooperative NOMA," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 5, no. 4, pp. 416-419, Aug. 2016.
- [9] Z. Ding, M. Peng, and V. Poor, "Cooperative non-orthogonal multiple access in 5G systems," *IEEE Communications Letters*, vol. 19, no. 8, pp. 1462-1465, Aug. 2015.
- [10] Y. Liu, Z. Ding, M. ElKashlan, and H. V. Poor, "Cooperative non-orthogonal multiple access with simultaneous wireless information and power transfer," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 14, no. 4, pp. 938-953, April 2016.
- [11] H. Sun, Q. Wang, R. Q. Hu, and Y. Qian, "Outage probability study in a NOMA relay system," *Proceedings of Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, pp. 1-6, March 2017.
- [12] Andrea Goldsmith, *Wireless Communications*, Cambridge Univ. Press, 2005.
- [13] G. L. Stuber, *Principles of mobile communication*, 2nd Ed., Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [14] Nam-Soo Kim, "Optimum power allocation of cooperative NOMA systems based on user relay," *Journal of the Institute of Internet, Broadcasting and Communications*, to be appear in October 2017.

#### 저자 소개

##### 김 남 수(정회원)



- 1986년~1994년: ETRI(전자 통신 연구원) 이동통신 연구단 무선기술 실장 역임
- 1991년: 연세대학교 대학원 전자공학과 공학박사
- 1991년~1991년: BNR(Bell Northern Research) 방문연구원

- 2002년~2003년: NJIT(New Jersey Institute of Technology) 교환교수
  - 1994년 ~ 현 재 : 청주대학교 전자공학과 교수
  - 2006년 ~ 2007년 : 청주대학교 학술정보처장
  - 2010년 ~ 2010년 : 청주대학교 입학처장
- <주관심분야> : 이동통신 시스템 무선링크 해석, NOMA 시스템 성능분석, 기회전송 릴레이 시스템