

# Switch-and-Stay Combining 기반 Mixed RF/FSO Dual-hop 전송 시스템 성능 분석

황 규 성<sup>†</sup>

## Performance Analysis of Mixed RF/FSO Dual-hop Transmission with Switch-and-Stay Combining

Kyu-Sung Hwang<sup>†</sup>

### ABSTRACT

In this paper, we provide the performance analyses of a dual-hop amplify-and-forward(AF) relay transmission composed of asymmetric radio-frequency(RF) and free-space optical(FSO) links. In the mixed RF/FSO system, a relay is equipped with two receive antennas for RF signals and one additional transmit antenna for FSO signals. In order to improve a performance of RF link, a switch-and-stay (SSC) diversity technique is applied at the relay which can provide a proper link performance with a low complexity. Specifically, we offer the performance analyses of the proposed system in terms of outage probability and secrecy outage probability. In numerical examples, we compare the system performances with no diversity and selection combining systems and verify our analytical results via computer-based Monte-Carlo simulations.

**Key words:** Mixed RF/FSO, Dual-hop Transmission, Amplify-and-forward, Switch-and-stay Combining, Outage Probability, Secrecy Outage Probability

### 1. INTRODUCTION

최근 자유 공간 광학(Free-space optical, FSO) 통신은 기존의 RF(radio frequency) 통신 스펙트럼 부족 현상을 해결한 통신 기법으로 많은 관심을 받고 있다. 허가된 주파수 대역에서만 통신이 가능한 RF 통신과는 달리 비면허 대역에서 광대역(wide-bandwidth) 통신이 가능하다는 점과 전송량 대비 가격적으로 저렴하다는 장점이 있다[1]. FSO통신은 빛을 사용하여 전송거리를 최대 수 백미터까지 확장할 수 있어 기존의 유선 광케이블로 구성된 네트워크 백홀

(back-haul)을 무선 시스템으로 대체할 수 있는 대체 기술로 평가 받고 있다. 그러나 빛을 사용하는 FSO 통신의 특성상 예측 불가능한 자연현상으로 인한 성능 저하가 문제점으로 대두되고 있으며, 주로 대기 난기류(atmospheric turbulence)에 가장 큰 영향을 받는다. 최근에 대기 난기류 등의 자연 현상에 의한 통신 성능 저하의 문제점을 극복하기 위하여 기존의 RF 통신과 FSO 통신이 결합된 혼합 (mixed) RF/FSO 통신 기술이 제시되었으며, 중계 전송(relay transmission) 기술을 활용하여 이중홉(dual-hop) 형태의 전송 기술이 많은 연구가 되고 있다. Mixed

※ Corresponding Author : Kyu-Sung Hwang, Address: (38428) Gamasil-gil 50, Hayang, Gyeongsan, Gyeongbuk, Korea, TEL : +82-53-600-5624, FAX : +82-53-600-5559, E-mail : kshwang@kiu.ac.kr  
Receipt date : Nov. 15, 2017, Revision date : Feb. 22, 2018  
Approval date : Mar. 9, 2018

<sup>†</sup> School of Electronic Eng., Kyungil University

※ This research was supported by Undergraduate Research Program through the Korea Foundation for The advancement of Science & Creativity (KOFAC) funded by the Ministry of Education (SBJ000025288)

RF/FSO 전송에서 첫 번째 홉은 RF 링크를 활용하며, 두 번째 홉은 FSO 링크를 통해서 전송되는 형태를 가진다[2].

최근 수 십년간 RF 통신 성능을 향상시키는 많은 기술들이 연구되었고, 그 중 가장 효율적이고 많이 활용되는 기술로 시간 혹은 공간 다이버시티(diversity) 기술을 들 수 있다[3]. 듀얼홉 전송 성능은 두 개의 통신 링크 중 나쁜 쪽 링크 성능에 따라 전체 성능이 지배되는 특징이 있으며, FSO 링크의 경우 전송 빛의 세기를 조절하여 성능 개선이 가능한 반면에 RF 링크는 제한된 전송 파워 규제로 인하여 단일 링크로 성능을 향상시키는데 한계가 있다. 이에 mixed RF/FSO 전송의 성능을 향상시키기 위하여 다중 안테나 시스템을 활용한 연구가 많이 진행되었으며 대표적인 다이버시티 기술인 maximal ratio combining(MRC) 및 selection combining(SC)를 활용한 연구가 최근에 발표되었다[4].

본 논문에서는 switch-and-stay combining(SSC) 기법을 활용한 mixed RF/FSO 통신 시스템을 분석하고자 한다. SSC 기법은 MRC 및 SC 기법보다 성능 열화는 있으나 모든 수신 신호를 측정 및 평가하는 대신 목표 임계치(required threshold) 값을 기준으로 수신 신호를 선택하여 시스템 복잡도를 낮추는 대표적인 기술로 활용되어온 기법이다. SSC 기반의 mixed RF/FSO 성능 평가는 시스템 불통 확률(outage probability, OP)을 기준으로 분석한다. 또한, 최근에 많은 연구가 이뤄지고 있는 물리 계층 보안 성능을 평가하고자 하며, 도청자(eavesdropper)가 있는 환경에서 제시된 시스템을 기반으로 통신 물리 계층

보안 성능을 보안 불통 확률(secretcy outage probability, SOP)을 통하여 살펴본다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 mixed RF/FSO 통신에 대한 시스템 구성 및 SSC 기법 활용에 대하여 살펴보고, 3장 및 4장에서는 시스템 불통 확률 및 보안 불통 확률에 대한 분석을 제시한다. 5장에서는 제안된 시스템의 성능을 시뮬레이션 및 분석 결과를 통하여 평가하고 이에 대한 논의를 한다.

## 2. SYSTEM DESCRIPTION

### 2.1 System Model

Fig. 1과 같이 송신 노드(source node)와 중계 노드(relay node)는 기존의 RF 통신 채널(S-R channel)로 연결되며, 중계 노드와 수신 노드(destination node)는 FSO 통신 채널(R-D channel)로 연결되는 혼합 환경을 고려한다. RF 채널에서 다이버시티 이득을 얻기 위하여 중계 노드에는 2개의 RF 수신 안테나가 있으며, FSO 통신을 위한 안테나가 별도로 존재한다. 또한, 물리 계층 보안 분석 환경을 위하여 도청 노드(eavesdropper node)가 존재하는 환경을 추가적으로 고려하는데 FSO 링크는 직진성이 강한 빛을 활용하는 특성상 도청이 어려운 환경으로 RF 신호에 대한 도청을 하는 환경만을 고려한다. 이중홉 전송 시스템은 RF 링크로 구성된 첫 번째 링크와 FSO 링크로 구성된 두 번째 링크로 설계되며, 중계 노드에서는 RF 수신 신호를 받아 증폭후전송( amplify-and-forward, AF)를 활용하여 FSO 통신을 통하여 최종 수신단에 데이터를 전송한다. 중계 노드에

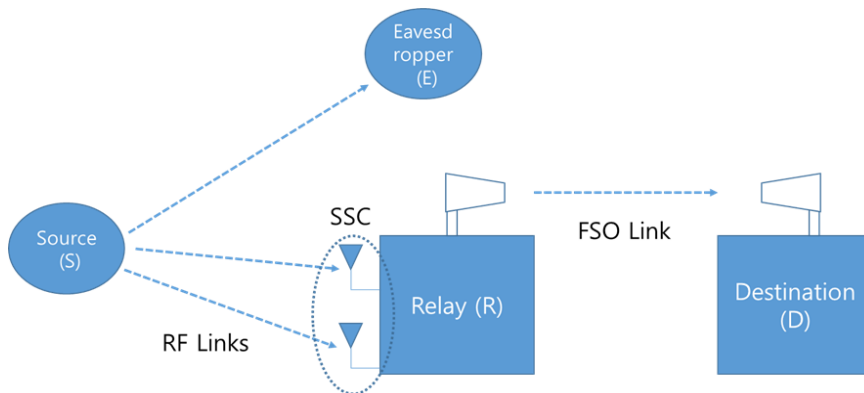


Fig. 1. Proposed mixed RF,FSO system model in the presence of an eavesdropper.

서 사용되는 AF 전송은 고정이득(fixed-gain) 중계 전송 기법을 활용한다. 위와 같은 전송 환경을 기반으로 최종적으로 수신노드에서의 신호대잡음비(signal-to-noise ratio, SNR)은 식 (1)과 같다[5].

$$\gamma_{eq} = \frac{\gamma_1 \gamma_2}{\gamma_2 + G}, \quad (1)$$

위 식에서  $\gamma_1$  은 S-R RF 링크의 SNR이며,  $\gamma_2$  는 R-D FSO 링크의 SNR이다.  $G$ 는 릴레이 단의 고정 이득이다.

## 2.2 Switch-and-stay combining

SSC는 안테나 선택 기법 중 가장 최적화된 SC를 대체하는 기술로 최적의 안테나 선택을 위해서 매번 모든 수신 신호를 평가해야만 하는 단점을 보완하기 위하여 제시된 기법이다. SSC는 두 개의 수신 안테나로 구성되는데 SC의 경우 모든 전송 경우에 두 개의 수신 신호를 평가하여 두 개의 수신 신호 중 높은 신호를 선택하는 방식인 반면에, SSC의 경우 적정 성능을 위한 수신 신호 임계값(threshold)를 미리 설정하여, 첫 번째 수신 신호를 평가한 후 첫 번째 수신 신호가 해당 임계값을 만족하는 경우 첫 번째 수신 신호를 사용하고, 임계값을 만족하지 못하는 경우에는 더 이상의 신호 평가 없이 두 번째 수신 신호를 사용하는 방식이다. 기본적으로 최적 수신 신호 결합(optimum combining) 기법 이외의 다른 결합 기법들은 적정 성능을 유지하면서 시스템 복잡도를 낮추는데 그 목적을 가지며, 특히 신호 품질이 좋은 구간(높은 SNR 구간)에서는 매번 전송할 때마다 모든 신호를 평가하고 분석하는 작업이 성능 향상 측면에 큰 이득이 없는 경우가 많아 다양한 시스템 복잡도를 낮추는 방식이 논의되어왔다.

Fig. 1에서 설명한 알고리즘을 기반으로 SSC 수신 SNR의 누적분포함수(cummulative distribution function, CDF)는 다음과 같이 나타낼 수 있다 [6].

$$F_{\gamma_1}(\gamma) = \begin{cases} \Pr[(\gamma_{ssc1} \leq \gamma_T) \text{ and } (\gamma_{ssc2} \leq \gamma)], & \gamma < \gamma_T \\ \Pr[(\gamma_T \leq \gamma_{ssc1} < \gamma) \text{ or } (\gamma_{ssc1} \leq \gamma_T \text{ and } \gamma_{ssc2} \leq \gamma)], & \gamma \geq \gamma_T \end{cases} \quad (2)$$

수신 SSC신호들이 독립동일분포(independent identically distributed, i.i.d.) 모델을 따른다고 가정하면 위 수식 (2)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{\gamma_1}(\gamma) = \begin{cases} F_{\gamma}(\gamma_T) F_{\gamma}(\gamma), & \gamma < \gamma_T \\ F_{\gamma}(\gamma) - F_{\gamma}(\gamma_T) + F_{\gamma}(\gamma) F_{\gamma}(\gamma_T), & \gamma \geq \gamma_T \end{cases} \quad (3)$$

RF링크가 독립동일분포 레일레이 페이딩(Rayleigh fading) 환경을 따를 때 식 (3)을 기반으로 SSC의 출력 SNR(output SNR),  $\gamma_1$ 의 CDF 및 확률밀도 함수(probability density function, PDF)는 다음과 같다.

$$F_{\gamma_1}(\gamma) = \begin{cases} 1 - (e^{-\gamma/\bar{\gamma}_1} + e^{-\gamma/\bar{\gamma}_1}) + e^{-(\gamma_T + \gamma)/\bar{\gamma}_1}, & \gamma < \gamma_T \\ 1 - 2e^{-\gamma/\bar{\gamma}_1} + e^{-(\gamma_T + \gamma)/\bar{\gamma}_1}, & \gamma \geq \gamma_T \end{cases} \quad (4)$$

$$f_{\gamma_1}(\gamma) = \begin{cases} \frac{1}{\bar{\gamma}_1} (1 - e^{-\gamma/\bar{\gamma}_1}) e^{-\gamma/\bar{\gamma}_1}, & \gamma < \gamma_T \\ \frac{1}{\bar{\gamma}_1} (2 - e^{-\gamma/\bar{\gamma}_1}) e^{-\gamma/\bar{\gamma}_1}, & \gamma \geq \gamma_T \end{cases} \quad (5)$$

식 (4)와 (5)에서  $\bar{\gamma}_1$ 는 S-R 링크의 평균 수신 SNR이고  $\gamma_T$ 는 원하는 성능 설정을 위한 변환 SNR 임계값(switching SNR threshold)이다.

## 2.3 FSO channel model

FSO 채널 모델은 log normal, gamma-gamma, negative exponential, Rician log normal 등 다양한 통계적 모델로 구성될 수 있다. 대기 난기류 영향에 대한 통계적 모델로 gamma-gamma 채널 모델링이 많이 활용되며,  $\alpha$  및  $\beta$ 의 방사 조도 파동(irradiance fluctuation)의 영향을 받는다. 위 변수들은 large-scale 및 small-scale 모델로 구분이 되는데 large-scale 모델은 파형 진행 방향에 따른 방사 조도 파동 영향이며, small-scale 모델은 large-scale에 의하여 영향을 받는 보다 작은 값의 모델이다. 이와 같은 Gamma-Gamma 페이딩 분포의 PDF는 다음과 같다 [2].

$$f_{\gamma_2}(\gamma) = \frac{(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2} \gamma^{(\alpha+\beta)/4 - 1}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)\bar{\gamma}_2^{(\alpha+\beta)/4}} K_{\alpha-\beta} \left( 2\sqrt{\alpha\beta\sqrt{\frac{\gamma}{\bar{\gamma}_2}}} \right) \quad (6)$$

위 식에서  $\bar{\gamma}_2$ 는 R-D 링크의 평균 수신 SNR이며  $\alpha$  및  $\beta$ 는 대기 난류 상태에 따른 파라미터 값이다.  $\Gamma(\cdot)$ 는 Gamma 함수이며,  $K_v(\cdot)$ 는 Modified Bessel function of the second kind with order  $v$ 이다.

### 3. OUTAGE PROBABILITY OF THE PROPOSED SYSTEM

시스템 불통 현상은 최종 수신 SNR이 특정 임계값보다 작을 때 원하는 시스템 동작이 불가능하다고 가정하고 해당 확률을 통해 분석하는 방식이며, 제안하는 시스템의 OP는 식 (1)의 fixed-gain AF 중계 통신의 최종 수신 SNR을 기반으로 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$P_{out}(\gamma_{th}) = F_{\gamma_{eq}}(\gamma_{th}) = \Pr\left[\frac{\gamma_1 \gamma_2}{\gamma_2 + G} < \gamma_{th}\right]. \quad (7)$$

위 식에서  $\gamma_{th}$ 은 불통 임계값(outage threshold)이며 식 (7)은 아래와 같이 계산이 가능하다.

$$P_{out}(\gamma_{th}) = \int_0^\infty \Pr\left[\frac{\gamma_1 x}{x + G} < \gamma_{th}\right] f_{\gamma_2}(x) dx. \quad (8)$$

식 (5) 및 (6)를 활용하면 제안하는 SSC 기반의 mixed RF/FSO 중계 통신의 OP는 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$P_{out}(\gamma_{th}) = \begin{cases} A \left(1 - Be^{-\gamma_{th}/\gamma_1} \gamma_{th}^{\frac{\alpha+\beta}{4}}\right) G_{0,5}^{5,0} \left[\frac{C}{\gamma_1} \gamma_{th} \middle| \kappa_1\right], & \gamma_{th} < \gamma_T \\ (A+1) \left(1 - Be^{-\gamma_{th}/\gamma_1} \gamma_{th}^{\frac{\alpha+\beta}{4}}\right) G_{0,5}^{5,0} \left[\frac{C}{\gamma_1} \gamma_{th} \middle| \kappa_1\right], & \gamma_{th} \geq \gamma_T \end{cases} \quad (9)$$

식 (9)에서  $G_{p,q}^{m,n}[\cdot]$ 는 Meijer-G function이며,  $\kappa_1$ ,  $A$ ,  $B$  변수는 아래와 같다.

$$\kappa_1 = \frac{\alpha-\beta}{4}, \frac{\alpha-\beta+2}{4}, \frac{\beta-\alpha}{4}, \frac{\beta-\alpha+2}{4}, \frac{-(\alpha+\beta)}{4}$$

$$A = 1 - e^{-\gamma_T/\gamma_1},$$

$$B = \frac{(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)\gamma_2^{(\alpha+\beta)/4}} \frac{1}{4\pi} \left(\frac{G}{\gamma_1}\right)^{(\alpha+\beta)/4},$$

$$C = \frac{(\alpha\beta)^2 G}{16 \gamma_2}$$

### 4. SECRECY OUTAGE PROBABILITY OF THE PROPOSED SYSTEM

시스템 보안 불통 현상은 최종 수신 보안 용량 (secrecy capacity,  $C_s$ )가 목표 보안 용량(target secrecy capacity,  $C_t$ )보다 작을 때 발생 한다. 제안하는 RF/FSO 시스템의 SOP는 아래와 같이 계산이 가능하다.

$$\begin{aligned} P_{sout}(C_t) &= \Pr[C_s(\gamma_{eq}, \gamma_e) < C_t] \\ &= \Pr\left[\frac{1}{2} \log_2 \left(\frac{1+\gamma_{eq}}{1+\gamma_e}\right) < C_t\right] \\ &= \Pr[\gamma_{eq} < T\gamma_e + T - 1] \end{aligned} \quad (10)$$

여기서  $T = 2^{2C_t}$ 이다.  $\gamma_e$ 는 소스 노드와 도청 노드 (S-E link) 간의 수신 SNR이며 Rayleigh fading 분포를 따른다고 가정한다. 식 (10)은 직접 풀기가 어려운 식으로 어느정도 이상의 SNR 구간에서  $T\gamma_e \gg T - 1$ 인 점을 활용하면 식 (10)은 하한계 lower-bound 형식으로 다시 쓸 수 있다 [7].

$$\begin{aligned} P_{sout}^L(C_t) &= \Pr[\gamma_{eq} < T\gamma_e] \\ &= \int_0^\infty F_{eq}(Tx) f_{\gamma_e}(x) dx \end{aligned} \quad (11)$$

식 (11)은 식 (9)를 활용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{sout}^L(C_t) = \int_0^{\gamma_T} F_{eq}(Tx) f_{\gamma_e}(x) dx + \int_{\gamma_T}^\infty F_{eq}(Tx) f_{\gamma_e}(x) dx \quad (12)$$

식 (12)는 아래와 같이 전개가 가능하다.

$$\begin{aligned} P_{sout}^L(C_t) &= \frac{1}{\gamma_e} \int_0^\infty A \left(1 - Be^{-Tx/\gamma_1} y^{\frac{\alpha+\beta}{4}}\right) G_{0,5}^{5,0} \left[\frac{TC}{\gamma_1} x \middle| \kappa_1\right] e^{-x/\gamma_e} dx \\ &\quad + \frac{1}{\gamma_e} \int_{\gamma_T}^\infty \left(1 - Be^{-Tx/\gamma_1} y^{\frac{\alpha+\beta}{4}}\right) G_{0,5}^{5,0} \left[\frac{TC}{\gamma_1} x \middle| \kappa_1\right] e^{-x/\gamma_e} dx \end{aligned} \quad (13)$$

식 (13)은 [8, eq.(7.831.1)]을 활용하면 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{sout}^L(C_t) &= 1 - \frac{AB}{\gamma_e} \left(\frac{T\bar{\gamma}_e + \bar{\gamma}_1}{\bar{\gamma}_1 \bar{\gamma}_e}\right)^{-\frac{\alpha+\beta}{4}-1} G_{1,5}^{5,1} \left[\frac{C\bar{\gamma}_e}{\gamma_1 + T\bar{\gamma}_e} \middle| \kappa_1\right] \\ &\quad + \frac{1}{\gamma_e} \int_{\gamma_T}^\infty \left(1 - Be^{-Tx/\gamma_1} y^{\frac{\alpha+\beta}{4}}\right) G_{0,5}^{5,0} \left[\frac{TC}{\gamma_1} x \middle| \kappa_1\right] e^{-x/\gamma_e} dx \end{aligned} \quad (14)$$

식 (14)에서  $\bar{\gamma}_e$ 는 S-E링크의 평균 수신 SNR이다.

### 5. NUMERICAL EXAMPLES

본 장에서는 3장 및 4장에서 논의한 SSC 기반 mixed RF/FSO AF 듀얼 홉 전송의 성능을 살펴본다. 기존의 한 개의 안테나만으로 구성된 시스템과 SC 기법이 적용된 시스템을 같이 비교하여 제안하는 시스템의 성능이 저 복잡도의 알고리즘으로 적절한 수준의 성능을 제시할 수 있음을 논의한다. Monte-

Carlo 실험을 기반으로 3장 및 4장에서 제시한 식 (9), (14)에 대한 타당성을 검증하였다.

Fig. 2는 3장에서 논의한 SSC 기반 mixed RF/FSO AF 듀얼 홉 전송의 불통확률 OP이다. 본 실험에서 평균 SNR은  $\bar{\gamma} = \bar{\gamma}_1 = \bar{\gamma}_2$ 로 설정하였다. Fixed-gain  $G = 1$ 로 세팅하였으며, FSO 채널의 방사 조도 파동 변수는  $\alpha = 4.2, \beta = 1.4$ 이다. SSC의 변환 임계값  $\gamma_T = 15$  dB 및 불통 임계값  $\gamma_{th} = 10$  dB를 고려하였다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 SSC 기반의 성능은 한 개의 안테나로 구성된 시스템보다 성능이 월등히 우수하며, 최적 선택 기법인 SC 기법과 비교할 시 작은 성능

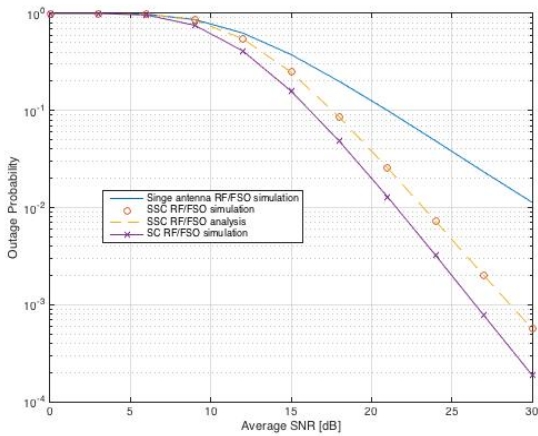


Fig. 2. Performance comparisons for outage probability of mixed RF/FSO AF dual-hop transmission with antenna diversity.

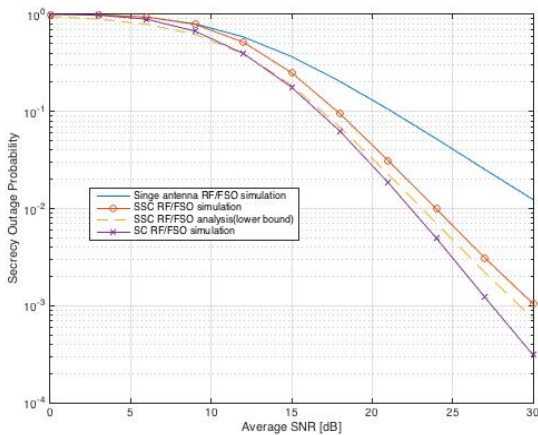


Fig. 3. Performance comparisons for secrecy outage probability of mixed RF/FSO AF dual-hop transmission with antenna diversity.

열화를 보여 적은 시스템 복잡도로 우수한 성능을 갖을 수 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 3는 4장에서 논의한 SSC 기반 mixed RF/FSO AF 듀얼 홉 전송의 보안불통확률 SOP이다. 본 실험의 평균 SNR값은 Fig. 2의 설정과 같으며 도청 채널의 평균 SNR은  $\bar{\gamma}_e = 3$  dB으로 설정하였다. 목표 보안 채널 용량  $C_s = 2$  bpz/Hz을 고려하였다. Fig. 2와 마찬가지로 제안된 SSC 기반 mixed RF/FSO AF 듀얼 홉 전송의 SOP도 최적 SC와 비교할 때 경쟁력 있는 성능 수치를 나타냈으며, 한 개의 안테나만을 사용하는 시스템보다는 우수한 성능을 보임을 입증하였다. 또한, 식 (14)에서 제시한 SOP의 하한계 결과 값이 성능 분석을 하는데 있어 벤치마킹이 될 수 있는 수준의 근사치를 제공함을 확인할 수 있다.

### 6. CONCLUSION

본 논문에서는 mixed RF/FSO AF 중계 전송 시스템에서 SSC 기반의 시스템 불통확률 OP를 분석하였으며, 추가적으로 도청자가 존재하는 채널에서의 보안불통확률 SOP를 분석하였다. 특히 중계 노드에 두 개의 수신 안테나가 존재하는 환경에서 저 복잡도 SSC 기반의 성능을 분석하였으며, 복잡도 대비 성능 활용 가능성을 입증하였다. 시스템 불통확률 OP 및 보안불통확률 SOP를 분석하기 위한 수식적 접근법을 제시하였으며, 최종적으로 수치적 실험을 통하여 본 논문에서 제시된 분석에 대한 검증을 하였다.

### REFERENCE

- [ 1 ] D. Kedar and S. Arnon, "Urban Optical Wireless Communication Networks: The Main Challenges and Possible Solutions," *IEEE Communications Magazine*, Vol. 42, No. 5, pp. S2-S7, 2004.
- [ 2 ] E. Lee, J. Park, D. Han, and G. Yoon, "Performance Analysis of The Asymmetric Dual-hop Relay Transmission with Mixed RF.FSO Links," *IEEE Photonics Technoogy Letter*, Vol. 23, No. 21, pp. 1642-1644, 2011.
- [ 3 ] K.S. Hwang, "Secrecy Outage Probability of AF Relay Transmission with MRC/TAS in Presence of Eavesdropper," *Journal of Korea*

*Multimedia Society*, Vol. 19, No. 3, pp. 620-625, 2016.

[4] L. Chen and W. Wang, "Multi-diversity Combining and Selection for Relay-assisted Mixed RF/FSO System," *Optics Communications*, Vol. 405, pp. 1-7, 2017.

[5] M.O. Hasna and M.S. Alouini, "A Performance Study of Dual-hop Transmissions with Fixed Gain Relays," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 3, No. 6, pp. 1963-1698, 2004.

[6] Y.C. Ko and M.S. Alouini, "Analysis of Optimization of Switched Diversity Systems," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 49, No. 5, pp. 1813-1831, 2000.

[7] H. Lei, Z. Dai, I. S. Ansari, K.H. Park, G. Pan, and M.S. Alouini, "On Secrecy Performance of Mixed RF-FSO Systems," *IEEE Photonics Journal*, Vol. 9, No. 4, pp. 1963-1698, 2017.

[8] I.S. Gradshteyn and I.M. Ryzhik, *Table of Integrals, Series and Products 7th*, Academic Press, New York, 2007.



### 황 규 성

2004년 8월 고려대학교 전기 전자  
전파공학부 공학사  
2010년 2월 고려대학교 전자 컴퓨  
터공학과 공학박사  
2010년 1월~2011년 8월 전자 부  
품연구원 선임연구원

2011년 9월~현재 경일대학교 전자공학부 부교수  
관심분야: 에너지하베스팅, FSO 통신, C-RAN, 시스템  
최적화