

Link Availability of Terrestrial Free-space Optical Communication Systems in Korea

Vuong V. Mai, Dung T. Ha, and Hoon Kim[†]

*School of Electrical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST),
291, Daehak-ro Yuseong-gu, Daejeon 34141, Korea*

(Received January 12, 2018; Revised February 5, 2018; Accepted February 14, 2018)

We analyze the link availability of terrestrial free-space optical (FSO) communication systems in Korea. For this purpose, we utilize several theoretical models to calculate the power losses induced by absorption and scattering in the atmospheric channel, using five-year meteorological data for three major cities in Korea (Seoul, Busan, and Daejeon). Also, we estimate the power variations at the receiver caused by scintillation in the data. Those power losses and variations are used to estimate the availability of FSO links in the three cities. The results show that link availability is estimated to be over 95% in Daejeon for a 3.5-km FSO link, when the transmitter power and receiver diameter are greater than 10 dBm and 7 cm respectively. Slightly worse link availabilities are obtained for Busan and Seoul.

Keywords: Free-space optics, Optical communication

OCIS codes: (060.2605) Free-space optical communication; (060.4510) Optical communications

우리나라 옥외 무선광통신 시스템의 링크 가용성

Vuong V. Mai · Dung T. Ha · 김 훈[†]

한국과학기술원 전기및전자공학부
Ⓞ 34141 대전광역시 유성구 대학로 291

(2018년 1월 12일 받음, 2018년 2월 5일 수정본 받음, 2018년 2월 14일 게재 확정)

본 연구에서 서울, 부산, 대전의 5년치 날씨 정보를 활용하여 우리나라 옥외 무선 광통신 시스템의 링크 가용성을 이론적으로 분석하였다. 이를 위하여 기상 상태와 시계(visibility)를 이용하여 대기의 흡수와 산란이 유발하는 광전력 감쇠를 계산하였다. 또한 날씨 정보를 활용하여 신틸레이션에 의한 수신 광전력 변화를 예측하였다. 대기의 흡수 및 산란에 의한 광전력 손실과 신틸레이션에 의한 광전력 변화가 서로 무관하다는 가정 하에 수신 광전력과 수신 감도를 비교하여 링크 가용성을 도출하였다. 분석 결과 10 dBm 송신기 출력과 7 cm 수광 직경을 가진 수신기를 사용한 3.5 km 시스템의 링크 가용성은 대전에서 95% 이상으로 예측되었다. 부산과 서울의 경우 대전보다 열악한 시계로 인하여 낮은 링크 가용성을 보였다.

Keywords: 자유공간광학, 광통신

OCIS codes: (060.2605) Free-space optical communication; (060.4510) Optical communications

I. 서 론

한정된 무선 RF 주파수 자원을 활용하여 대용량 무선 통신 신호를 전송하는 것이 갈수록 어려워짐에 따라 최근 무선 광통신 시스템에 대한 관심이 상당하다^{1,2)}. 무선 광통신은 대용량 통신 신호를 경제적으로 생성하고 검출할 수 있는 광섬유 광학 기술과 설치가 용이하고 이동체에 적용 가능한 무선 전송 기술의 장점을 모두 활용할 수 있다는 점에서 건물 간을 연결하는 시스템부터 인공 위성간 전송 시스템까지 다

양하게 활용되고 있다. 그러나 대기권 내에서 운용되는 옥외 무선 광통신 시스템은 날씨 변화 및 대기 난류(atmospheric turbulence)에 의한 빛의 흡수 및 산란, 그리고 대기의 굴절을 변화 등에 그 성능이 크게 제한 받는다. 안개, 눈, 비 등을 구성하는 대기 입자들은 빛의 흡수와 산란을 유도하여 수신 신호의 광전력을 크게 약화시킨다. 대기 중의 입자가 상대적으로 적은 맑은 날조차 대기 난류에 의한 빔살 원터링(beam wandering)과 신틸레이션(scintillation) 등에 의하여 대기의 굴절률이 공간적으로 또한 시간적으로 변화하므로 빔살의

[†]E-mail: hoonkim@kaist.ac.kr, ORCID: 0000-0001-7395-3695

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

진행선이 송신단과 수신단을 직선으로 연결하는 조준선으로부터 벗어나게 되며(빛살 원터링 현상), 빛살의 광전력이 공간적으로 균일하지 못하고 큰 폭으로 변화하게 된다(신틸레이션 현상)^[2]. 이러한 대기의 광학적 현상은 결과적으로 송신단에서 일정한 광전력의 신호를 전송하여도 수신단 광전력을 시시각각 변화시키는 주된 요인이 된다. 만약 수신 광전력이 수신 감도에 미치지 못하는 경우 무선 광통신 시스템은 원하는 수준의 비트 오류(bit-error rate)를 제공할 수 없으므로 이용할 수 없는 상태가 된다.

무선 광통신 시스템의 성능을 나타내는 중요한 지표 중의 하나는 링크 가용성(link availability)이다. 여기에서 링크 가용성이란 전체 시스템 운용시간 중 요구되는 비트 오류를 만족하는 시간의 비율을 나타낸다. 무선 광통신 시스템을 설치하기에 앞서 특정 지역에서 운용할 무선 광통신 시스템의 링크 가용성을 미리 예측하는 것이 매우 중요하다. 이를 통하여 특정 거리를 전송해야 할 무선 광통신 시스템을 단일 홉(single-hop)으로 구성할지 아니면 다중 홉(multi-hop)으로 구성한다면 홉 수를 몇 개로 할지 등을 결정할 수 있다. 또한 무선 광통신 시스템과 상호 보완적으로 운용할 수 있는 통신 시스템(예, 밀리미터파 전송 시스템)을 추가적으로 마련하여야 할지 등도 결정할 수 있다.

무선 광통신 시스템의 링크 가용성을 분석한 결과가 이미 여럿 발표된 바 있다^[3-10]. 실험적으로 직접 측정한 결과도 있고^[3,4], 날씨 정보를 활용하여 링크 가용성을 이론적으로 예측한 결과도 보고된 바 있다^[5-10]. 그러나 실험 결과의 경우 특정 장소에서 특정 전송 거리에 대하여 측정된 결과만을 보고하고 있으므로 이러한 결과를 다른 지역에서 다른 전송 거리로 운용될 무선 광통신 시스템의 링크 가용성을 예측하는데 활용하기 어렵다. 한편 링크 가용성을 이론적으로 예측한 결과의 경우 주로 대기 채널의 흡수 및 산란이 유발하는 광전력 손실만을 계산하였다^[5-10]. 예를 들면, 참고문헌 [5]는 미국의 17개 도시에 대하여 Kim 모델을 이용하여 날씨 정보로부터 대기 채널의 흡수·산란 계수를 계산한 후, 옥외 무선 광통신 시스템의 링크 가용성을 예측하였다. 참고문헌 [6]과 [7]에서는 유럽 도시에 대하여 무선 광통신 시스템의 링크 가용성을 예측하기 위하여 대기 채널의 흡수 및 산란에 의한 광전력 손실에 관한 서로 다른 모델이 각각 비교되었으나, 신틸레이션의 영향이 링크 가용성 예측에 포함되지 않았다. 참고문헌 [8], [9], [10]에서는 각각 슬로바키아, 인도, 말레이시아의 무선 광통신 시스템의 링크 가용성을 예측하기 위하여 특정 날씨 상황에 대기 채널의 흡수 및 산란을 잘 기술하는 모델을 선택하였다. 이와 같이 기존의 옥외 무선 광통신 시스템의 링크 가용성에 관한 연구 결과들은 신틸레이션의 영향을 고려하지 않았다. 또한 이러한 결과들은 외국 날씨 정보를 활용하여 예측한 결과이므로 우리나라 옥외 무선 광통신 시스템의 링크 가용성 예측에 직접적으로 활용될 수 없다.

본 논문에서는 우리나라의 대표적인 세 도시(서울, 부산, 대전)의 지난 5년 날씨 정보를 활용하여 옥외 무선 광통신 시스템의 링크 가용성을 이론적으로 분석하였다. 기존 연구결과

와 달리 본 연구에서는 대기 채널의 흡수 및 산란이 유발하는 광전력 손실뿐 아니라 신틸레이션이 유발하는 광전력 변동도 고려하여 링크의 가용성을 분석하였다. 또한 대기 채널의 흡수 및 산란에 의한 광전력 손실을 보다 정확하게 모델링하기 위하여 특정 날씨에 정확도가 높다고 알려진 모델을 날씨에 따라 선택하여 분석에 활용하였다. 본 연구 결과는 저자들이 알고 있는 한 장기간 날씨 정보를 활용하여 우리나라의 무선 광통신 시스템의 링크 가용성을 분석한 최초의 결과로서 우리나라 옥외 무선 광통신 시스템의 설치 유무 및 설치 방법을 결정하는데 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

II. 무선 광통신 시스템의 링크 가용성의 이론적 모델링

본 연구에서는 온도, 습도, 풍속, 시계(visibility), 기상 상태(예, 맑음, 안개, 눈, 비) 등의 날씨 정보를 활용하여 대기 채널이 유발하는 흡수 및 산란, 그리고 신틸레이션의 영향을 이론적으로 분석하는 방법을 활용하였다. 이는 기상청, 공항 등에서 제공하는 날씨 정보가 특정 지역의 날씨를 대변할 수 있을 뿐 아니라 장기간에 걸쳐 일관된 데이터를 제공하기 때문이다.

일반적으로 무선 광통신 시스템의 채널이 유발하는 손실, h 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$h = h_g h_a h_s \quad (1)$$

여기서 h_g 는 대기 채널 효과가 없는 경우에도 송수신기단에서 빛살 크기 불일치로 인하여 발생하는 기하광학적 손실, h_a 는 대기의 흡수 및 산란에 의한 손실, 그리고 h_s 는 신틸레이션에 의한 손실을 나타낸다.

송신단에서 가우시안 빛살을 보내며, 이 빛살 형태가 수신단까지 평균적으로 유지된다고 가정할 때 기하광학적 손실은 다음과 같이 표현된다^[11].

$$h_g = \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{\sqrt{\pi} a}{\sqrt{2} w_z} \right) \right]^2 \quad (2)$$

여기서 a 는 수신기의 반경, w_z 는 수신단에서 빛살의 세기가 중심으로부터 e^{-2} 감쇠하는 반경이다.

대기의 흡수 및 산란에 의한 손실은 Beers-Lambert 법칙에 따라 다음과 같이 표현된다.

$$h_a = \exp(-\alpha L/4.343) \quad (3)$$

여기서 α 는 흡수·산란 계수(dB/km)로서 날씨 정보 중 시계와 매우 밀접하게 연관되어 있다.

시계는 대기를 진행하는 550 nm 파장의 빛 세기가 5%까지 감쇠하는 전송 거리로 정의된다. 흡수·산란 계수와 시계를 연관 짓는 여러 실험적·이론적 모델이 보고된 바 있다. 그 중 Kim 모델에 따르면 흡수·산란 계수는 다음과 같이 표현된다^[11].

$$\alpha_{Kim} = \frac{13}{V} \left(\frac{\lambda}{0.55} \right)^{-q} \quad (4)$$

여기서 λ 는 빛의 파장(μm) 그리고 V 는 시계(km)이다. 위 식에서 지수 q 는 다음과 같이 주어진다.

$$q = \begin{cases} 1.6 & V > 50 \\ 1.3 & 6 < V \leq 50 \\ 0.16V + 0.34 & 1 < V \leq 6 \\ V - 0.5 & 0.5 < V \leq 1 \\ 0 & V \leq 0.5 \end{cases} \quad (5)$$

Kim 모델은 (4) 식으로 표현되는 이론적 토대에 상기 실험적인 지수 값을 적용한 모델이다. Kim 모델은 비교적 넓은 시계 범위에 대하여 정확한 흡수·산란 계수를 예측할 수 있으나, 시계가 낮은 경우에는 타 모델에 비하여 상대적으로 부정확하다고 알려져 있다^[12].

다른 모델 중 하나인 Ijaz 모델은 실험실에서 인공적으로 생성된 안개나 연기를 이용하여 만든 모델로서 안개 낀 날 대기의 흡수와 산란에 의한 손실을 잘 기술한다고 알려져 있다^[12]. 이 모델은 안개의 경우 흡수·손실 계수는 다음과 같이 표현된다.

$$\alpha_{Ijaz} = \frac{13}{V} \left(\frac{\lambda}{0.55} \right)^{-0.1428\lambda + 0.0947} \quad (6)$$

또 다른 모델인 Koschmieder 모델에서 흡수·손실 계수는 다음과 같이 표현된다^[6,13].

$$\alpha_{Koschmieder} = \frac{13}{V} \quad (7)$$

이 이론적 모델은 대기 입자가 파장에 비해 커서 파장의 존성 없는 비선택적 페이딩(non-selective fading)을 기술하는데 적합하다^[11].

본 연구에서는 대기 채널의 흡수·산란 계수를 정확하게 모델링하기 위하여 특정 기상 상태에 정확도가 높다고 알려진 모델을 선택하여 활용하였다. 즉, 맑은 날과 안개가 열게 끼어 시계가 좋은 날씨에는 Kim 모델(시계 1 km 초과), 짙은 안개가 낀 날은 Ijaz 모델(시계 1 km 이하), 비와 눈이 오는 날은 Koschmieder 모델을 활용하였다.

대기의 흡수 및 산란과 별도로 대기 난류에 의하여 빛의 세기가 공간적으로 또한 시간적으로 변화한다. 이러한 신틸레이션 현상에 의한 수신단에서 빛살 세기의 변화는 대기의 굴절률 구조 상수(C_n^2)를 활용하여 이론적으로 예측할 수 있다. 이를 위하여 본 연구에서는 BKB 모델을 활용하였다. 이 모델은 온도, 풍속, 상대 습도 등 거시적 날씨 정보와 C_n^2 값과의 상관성을 근거로 수립한 실험적 모델이다. 본 연구에서는 다음의 식을 사용하였다^[14].

Table 1. Values of W parameter used in Eq. (8)

| Time | W | Time | W |
|-------------|------|-------------|------|
| 0:00-1:00 | 0.11 | 12:00-13:00 | 0.9 |
| 1:00-2:00 | 0.11 | 13:00-14:00 | 0.8 |
| 2:00-3:00 | 0.11 | 14:00-15:00 | 0.59 |
| 3:00-4:00 | 0.07 | 15:00-16:00 | 0.32 |
| 4:00-5:00 | 0.08 | 16:00-17:00 | 0.22 |
| 5:00-6:00 | 0.06 | 17:00-18:00 | 0.1 |
| 6:00-7:00 | 0.05 | 18:00-19:00 | 0.08 |
| 7:00-8:00 | 0.1 | 19:00-20:00 | 0.13 |
| 8:00-9:00 | 0.51 | 20:00-21:00 | 0.13 |
| 9:00-10:00 | 0.75 | 21:00-22:00 | 0.13 |
| 10:00-11:00 | 0.95 | 22:00-23:00 | 0.13 |
| 11:00-12:00 | 1 | 23:00-24:00 | 0.13 |

$$C_n^2 = 3.8 \times 10^{-14} W + 2 \times 10^{-15} T - 5.3 \times 10^{-13} - 2.8 \times 10^{-15} RH + 2.9 \times 10^{-17} RH^2 - 1.1 \times 10^{-19} RH^3 - 2.5 \times 10^{-15} W_s + 1.2 \times 10^{-15} W_s^2 - 8.5 \times 10^{-17} W_s^3 \quad (8)$$

여기서 W 는 하루 중 태양이 대기에 영향을 미치는 기간을 고려한 계수, W_s 는 풍속(m/s), T 는 온도(K), 그리고 RH 는 상대 습도(%)이다. 표 1은 시간대 별로 사용된 W 값을 보여 준다. 이 표는 06시 일출, 18시 일몰을 기준으로 작성된 표이다. 따라서 계절에 따라 W 값이 조금씩 변화하지만, 이 변화가 링크 가용성 예측 값을 결정하는 주된 변수가 아니므로 본 연구에서는 계절에 관계없이 표 1의 값을 사용하였다. 식 (8)의 BKB 모델은 9~35°C, 상대습도 14~92%, 그리고 풍속 10 m/s 이하 범위에서 정확도가 높다고 알려져 있다^[14].

대기의 신틸레이션 효과가 크지 않을 경우 신틸레이션에 의한 광전력의 변화는 로그노말(lognormal) 분포를 따른다고 알려져 있다. 따라서 신틸레이션에 의한 세기 변화 확률 분포 함수는 다음과 같이 표현할 수 있다^[15].

$$PDF(h_s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_s h_s} \exp\left(-\frac{(\ln h_s + \sigma_s^2/2)^2}{2\sigma_s^2}\right) \quad (9)$$

여기서 로그 세기 분산(σ_s^2)은 다음과 같이 표현된다.

$$\sigma_s^2 = \exp\left(-\frac{0.49\sigma_R^2}{(1+0.18d^2+0.56\sigma_R^{12/5})^{7/6}}\right) + \exp\left(-\frac{0.51\sigma_R^2}{(1+0.9d^2+0.62\sigma_R^{12/5})^{5/6}}\right) - 1 \quad (10)$$

식 (10)에서 $d = (kD^2/4L)^{1/2}$, $\sigma_R^2 = 1.23C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}$ 는 Rytov 분산이며, 여기서 $k = 2\pi/\lambda$ 는 빛의 파수, L 은 링크의 전송 거리, 그리고 D 는 수신기의 직경이다.

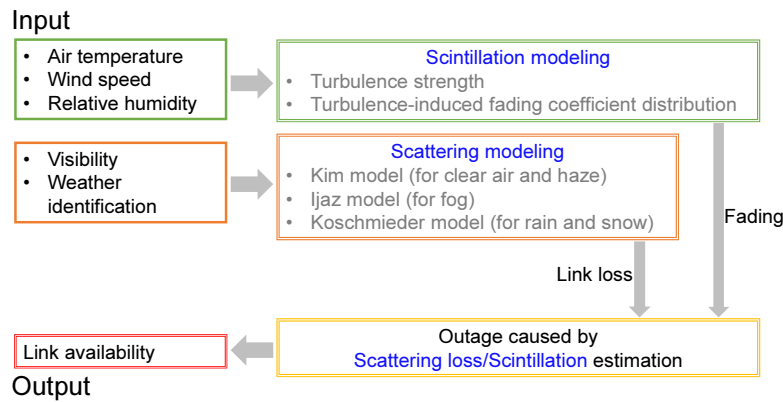


Fig. 1. Methodology utilized in this research for the estimation of link availability.

옥외 무선 광통신 시스템의 링크 가용성은 채널이 유발하는 손실(h)을 상기 수식들을 이용하여 계산함으로써 예측할 수 있다. 링크 가용성은 수신 광전력(P_r)이 수신 감도(P_{rs})보다 큰 확률이므로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{availability} = P\{P_r \geq P_{rs}\} \\ P\{(P_t - P_l - P_m)h \geq P_{rs}\} \\ P\{(P_t - P_l - P_m)h_g h_s h_a \geq P_{rs}\} \\ P\left\{h_a \geq \frac{P_{rs}}{(P_t - P_l - P_m)h_g h_s}\right\} \\ 1 - CDF\left\{\frac{P_{rs}}{(P_t - P_l - P_m)h_g h_s}\right\} \quad (11)$$

여기서 P_t 는 송신기 출력 전력, P_l 은 송수신기의 광학부 손실, 그리고 P_m 은 시스템 광전력 마진이다. 또한 $CDF(\cdot)$ 는 식 (9)의 누적 확률 함수이며, 다음과 같이 표현된다.

$$CDF(h_s) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf}\left(\frac{\ln h_s - \sigma_s^2/2}{\sqrt{2}\sigma_s}\right) \quad (12)$$

그림 1은 본 연구에서 활용한 옥외 무선 광통신 시스템의 링크 가용성 예측 방법을 정리한 것이다. 대기 채널의 흡수와 산란이 야기하는 광신호의 손실을 예측하기 위하여 기상 상태에 따라 3개의 모델을 활용하여 시계로부터 흡수·산란 계수를 구하였다. 또한 온도, 상대습도, 풍속 등의 날씨 정보를 이용하여 굴절률 구조 상수(C_n^2)를 예측하고 이로부터 신틸레이션이 야기하는 광신호의 확률 분포 함수를 계산하였다. 마지막으로 대기의 흡수 및 산란에 의한 광전력 손실과 신틸레이션에 의한 광전력 변화가 서로 무관하다는 가정 하에 수신 광전력과 수신 감도를 비교하여 링크 가용성을 도출하였다.

III. 우리나라 무선 광통신 시스템의 링크 가용성

우리나라 옥외 무선 광통신 시스템의 링크 가용성을 예측하기 위하여 2013년 1월에서 2017년 12월까지 5년간 서울,

부산, 대전의 날씨 정보를 활용하였다. 날씨 정보는 매 3시간마다 간격으로 측정된 값으로 온도, 풍속, 상대습도, 시계, 기압, 기상 상태 정보이다. 각 파라미터(parameter)의 해상도는 온도, 풍속, 상대습도, 시계, 기압에 대하여 각각 1°C, 1 km/h, 1%, 1 km, 1 millibar 이다. 상기 기간 동안 서울, 부산, 대전의 평균 온도는 각각 13, 15, 13°C였으며, 평균 풍속은 각각 10, 12, 6 km/h였다. 또한 세 도시의 평균 시계는 각각 9, 12, 14 km, 평균 습도는 각각 61, 67, 71%였다.

표 2는 링크 가용성 분석을 위하여 사용된 무선 광통신 시스템의 파라미터를 보여준다. 송신기의 파장을 1550 nm로 설정하였으며, 송신된 빛살이 수신기 위치에서 1 m 직경을 갖는다고 가정하였다. 또한 2.5 Gb/s 신호를 APD 기반 광수신기를 사용하여 수신하는 경우를 가정하여 수신 감도를 -35.9 dBm (비트 오류: 10^{-9})으로 설정하였다. 송수신기에서 렌즈로 구성된 광학부의 삽입손실은 송신단과 수신단을 합하여 6 dB로 가정하였다. 시스템 마진은 6 dB로 설정하였다.

먼저 본 연구에서 채택한 방법이 기존의 방법과 비교하여 링크 가용성에 미치는 영향을 살펴보았다. 이를 위하여 기상 상태에 관계없이 흡수 및 산란에 관한 단일 Kim 모델을 사용했을 때와 기상 상태별로 다른 모델을 사용했을 때의 링크 가용성을 비교하였다. 또한 신틸레이션이 옥외 무선 광통신 시스템의 링크 가용성에 미치는 영향도 살펴보았다. 그림 2는 대전의 날씨 정보를 활용하여 예측한 링크 가용성을 링크의 전송 거리에 대하여 도시한 결과이다. 송신기 광전력은 10 dBm, 수신기 직경이 10 cm로 설정하였다. 결과를 보면

Table 2. FSO system parameters used in the analysis

| | |
|---------------------------------|-----------|
| Transmitted power | 10-20 dBm |
| Transmission wavelength | 1550 nm |
| Link distance | 1-10 km |
| Link margin | 6 dB |
| Beam spot size at RX | 1 m |
| Receiver sensitivity (2.5 Gb/s) | -35.9 dBm |
| Receiver diameter | 70-150 mm |
| System loss | 6 dB |

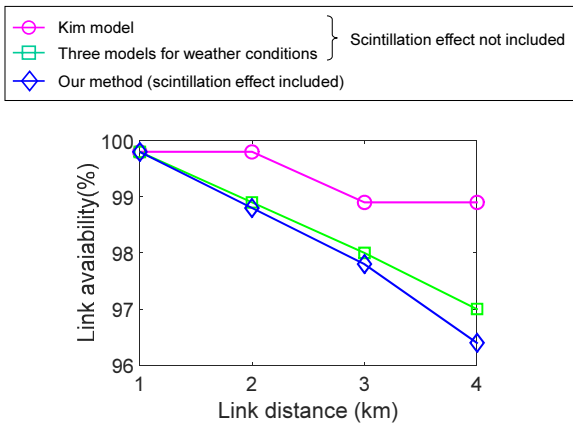


Fig. 2. Link availabilities estimated by using different models.

Kim 모델을 사용하여 예측한 링크 가용성과 본 연구 결과로 예측한 가용성에 상당한 차이가 있음을 알 수 있다. 예를

들면, 링크 전송 거리가 2 km인 경우 Kim 모델로 예측한 링크 가용성은 99.8%에 달하지만, 본 연구 방법에서는 98.8%로 예측되었다. 두 예측 방법의 결과가 차이가 나는 주된 요인은 Kim 모델이 안개로 시계가 나쁜 날씨에 대하여 흡수·산란 계수를 낮게 추산하기 때문이다. 한편 2 km 무선 광통신 시스템의 경우 신틸레이션은 0.1%의 아주 작은 링크 가용성 차이를 유발하였다. 그러나 신틸레이션 효과는 전송 거리가 증가함에 따라 두드러진다. 결과에서 보듯이 전송 거리가 4 km로 증가한 경우 신틸레이션을 고려했을 때와 그렇지 않은 경우 약 0.7%의 링크 가용성 차이를 보인다. 이 차이는 무선 광통신 시스템을 1년간 운용하였을 때 약 2시간 13시간에 해당한다.

다음으로 수신기 직경을 변화시키면서 도시별로 링크 전송 거리에 따라 링크 가용성을 예측하였다. 그림 3은 본 연구 방법을 활용하여 예측한 서울, 부산, 대전의 링크 가용성을 보여준다. 식 (2)에서 보는 바와 같이 수신기의 수광 면적이

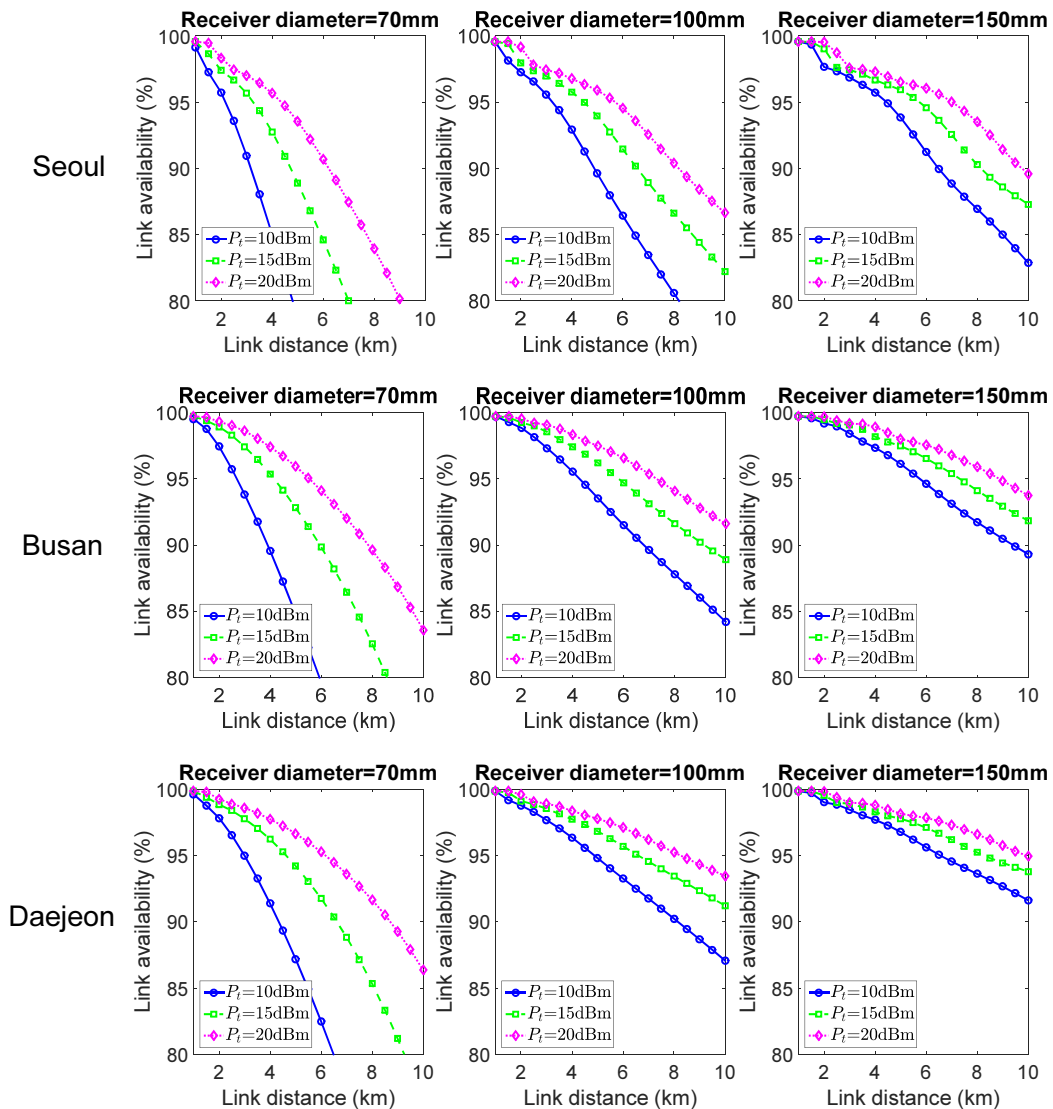


Fig. 3. Link availabilities as a function of link distance.

증가할수록 기하광학적 손실이 감소하므로 링크 가용성이 개선된다. 또한 송신기의 출력 전력에 비례하여 수신 전력이 증가하므로 링크 가용성이 개선된다. 그럼에도 불구하고 이 두 방법은 모두 송수신기의 구현 비용을 상승시킨다. 결과를 보면 도시별 링크 가용성 95%를 기준으로 판단할 때, 송신기 출력 전력 10 dBm, 수신기 직경 7 cm로 구성된 무선 광통신 시스템의 경우 서울, 부산, 대전의 최대 링크 전송 거리는 각각 2.1, 2.5, 3.0 km로 예측되었다. 즉, 대전의 최대 전송 거리가 가장 길고, 서울이 가장 짧다. 앞서 살펴본 바와 같이 송신기 출력 전력이 증가하고 수신기 직경이 커질수록 최대 링크 전송 거리는 증가하지만, 도시별 상대적 비교 결과는 변하지 않는다. 예를 들면, 송신기 출력 전력이 20 dBm, 수신기 직경이 15 cm인 경우 10 km 전송 거리의 경우 링크 가용성은 서울, 부산, 대전에 대하여 각각 88.9, 93.7, 94.6%로 예측되었다. 본 연구에서 비교한 세 도시 중 서울의 링크 가용성이 가장 낮은 주된 원인은 서울의 낮은 시계 때문이다. 세 도시 중 서울의 평균 시계가 가장 낮았으며(9 km), 대전이 가장 높았다(14 km). 한편 세 도시에서 신틸레이션이 링크 가용성에 미치는 영향은 거의 유사하게 나타났다. 식 (8)에 표현된 바와 같이 대기 난류에 의한 신틸레이션은 온도가 증가할수록, 습도가 낮을수록, 바람이 약할수록 증가한다¹⁴⁾. 부산이 서울과 대전보다 평균 온도가 높지만 평균 풍속이 가장 높았다. 대전은 세 도시 중 평균 온도가 낮고, 습도가 높지만, 풍속이 가장 느렸다. 따라서 정오 시간을 기준으로 평균 날씨 정보에 대한 세 도시의 굴절률 구조 상수 값은 $1.8 \times 10^{-13} \sim 2.0 \times 10^{-13} \text{ (m}^{-2/3}\text{)}$ 으로 도시별 큰 차이가 없었다. 그림 3의 결과에는 도시되어 있지 않지만 전송거리가 증가할수록 신틸레이션의 영향이 잘 나타났다. 예를 들면 송신기 출력 전력 10 dBm, 수신기 직경 10 cm로 구성된 10 km 무선 광통신 시스템의 경우 신틸레이션의 영향을 고려하지 않을 경우 예측된 링크 가용성은 대전에서 90%였다. 그림 3에서 보듯이 경우 신틸레이션 영향을 고려하면 그렇지 않은 경우보다 링크 가용성이 3% 차이를 보인다. 그럼에도 불구하고 전송거리가 증가할수록 흡수 및 산란의 영향도 증가하므로 링크 가용성은 주로 대기의 흡수 및 산란에 의한 시계에 의하여 결정되었다.

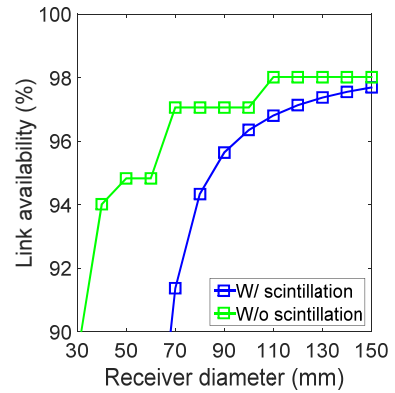


Fig. 4. Link availability vs receiver diameter (Daejeon). The transmitter power and link distance are 10 dBm and 4 km, respectively.

신틸레이션이 링크 가용성에 미치는 영향은 수광 면적에 크게 영향을 받는다. 이는 수광 면적이 커질수록 공간적으로 변화하는 신틸레이션 영향을 평균화시킬 수 있기 때문이다. 수광 면적을 넓히는 조리가 평균화(aperture averaging)는 신틸레이션의 영향을 완화시키는 대표적인 방법으로도 활용된다¹⁶⁾. 그림 4는 송신기 전력 10 dBm, 링크의 전송 거리가 4 km일 때 수신기 직경에 대한 대전의 링크 가용성을 보여준다. 조리가 평균화 효과에 의하여 수신기의 수광 면적이 증가함에 따라 신틸레이션의 효과를 고려하였을 경우와 그렇지 않은 경우에 대하여 링크 가용성의 차이가 감소하고 있음을 볼 수 있다. 결과에서 볼 수 있듯이 수신기의 직경이 작은 경우 신틸레이션 영향을 고려하는 것이 링크 가용성을 정확하게 예측하는데 필수적임을 알 수 있다.

그림 4에서 살펴본 바와 같이 수신기의 수광 면적이 증가할수록 높은 링크 가용성을 얻을 수 있다. 그러나 이를 위하여 고가의 대형 렌즈가 수신단에 요구된다. 그림 5는 특정 링크 가용성을 얻기 위하여 필요한 수신기의 최소 직경을 보여준다. 송신단의 출력을 10 dBm 으로 가정하였으며, 대전의 날씨 데이터를 활용하였다. 결과를 보면 2~4 km 전송거리 범위 내에서 10 dBm 출력의 송신기를 사용하여 대전에서 현실적으로 달성할 수 있는 링크 가용성은 95% 수준이다.

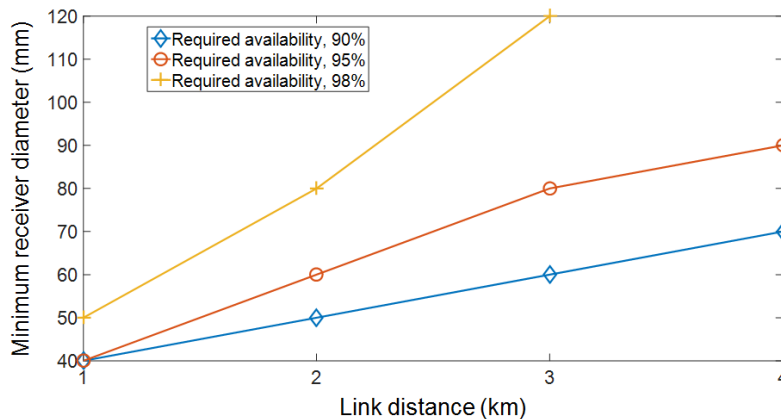


Fig. 5. Minimum receiver diameter required to achieve specific link availability (Daejeon, 10-dBm transmitter power).

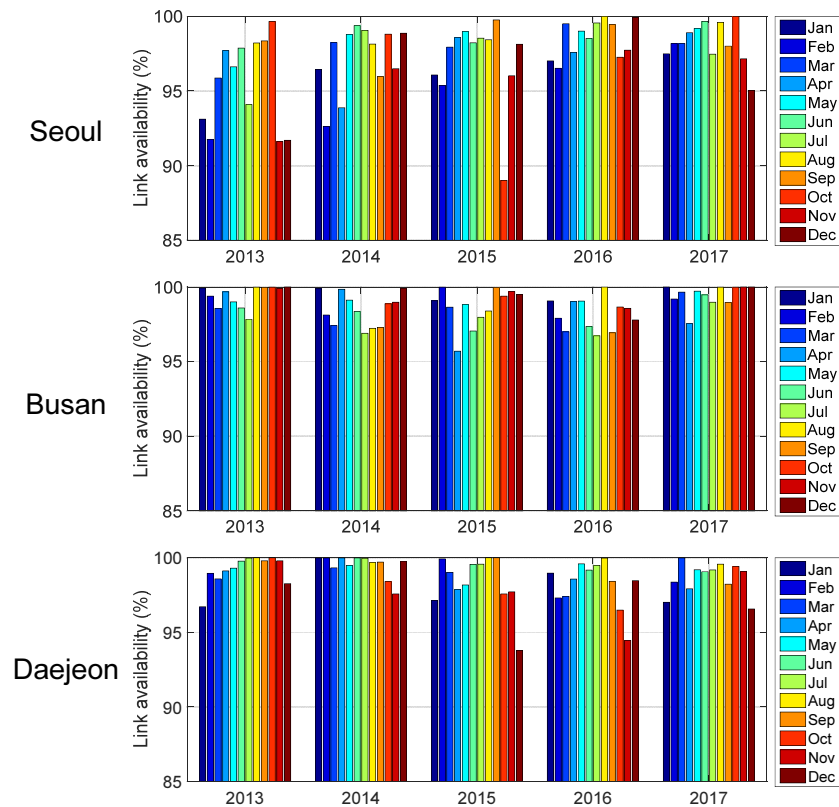


Fig. 6. Monthly link availability for 2-km FSO system.

예를 들면, 전송거리가 4 km인 시스템에서 95%의 링크 가용성을 얻기 위하여 요구되는 최소 수신기 직경은 9 cm이다. 그러나 링크 가용성을 98%로 향상시키기 위해서는 19 cm 이상의 대형 수신기가 요구된다.

그림 6은 2 km 무선 광통신 시스템에 대한 월별 링크 가용성을 보여준다. 송신기 출력 전력은 10 dBm, 수신기 직경은 7 cm로 설정하였다. 결과를 보면 서울과 대전은 겨울에 낮고, 여름에 높은 링크 가용성을 보인다. 반면에 부산은 상대적으로 여름에 낮고, 겨울에 높은 링크 가용성을 보였다. 전송 거리가 2 km인 무선 광통신 시스템의 경우 그림 2에 도시한 바와 같이 신틸레이션이 링크 가용성에 미치는 영향이 상대적으로 작으므로 이러한 계절별 링크 가용성 경향은 계절별 각 도시의 시계가 변화하기 때문으로 해석된다.

IV. 결 론

본 논문에서는 우리나라 옥외 무선 광통신 시스템의 링크 가용성을 대기의 흡수 및 산란이 야기하는 광신호의 손실뿐 아니라 신틸레이션에 의한 수신 광신호 변화를 고려하여 예측하였다. 이를 위하여 서울, 부산, 대전의 5년치 날씨 정보를 이용하여 기상 상태에 따라 서로 다른 대기 흡수·산란 계수 예측 모델을 활용하였다. 또한 날씨 정보를 이용하여 대기의 굴절률 구조 상수를 예측함으로써 신틸레이션이 유발하는 수신 광신호의 변화를 링크 가용성 예측에 활용하였다.

빛살이 지표면과 수평으로 진행되는 옥외 무선 광통신 시스템의 경우 대기 흡수 및 산란에 의한 광신호 감쇠가 링크 가용성을 제한하는 주된 요인이다. 그러나 전송 거리가 증가함에 따라 신틸레이션이 링크 가용성의 정확성에 무시할 수 없는 영향을 주었다. 본 연구에서는 전송 거리가 10 km 이내의 옥외 시스템의 링크 가용성을 분석하였으므로 빛살 원터링 효과를 고려하지 않았다. 또한 건물의 흔들림 등이 야기하는 광송수신기의 오정렬(misalignment) 영향도 포함되어 있지 않다. 따라서 본 연구결과는 실제 무선 광통신 시스템이 얻을 수 있는 최대 링크 가용성으로 해석되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구 분석에 있어서 많은 조언을 해주신 KAIST 정윤철 교수님께 감사드립니다.

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 미래 전투체계 네트워크기술 특화연구센터 사업의 일환으로 수행되었습니다 (UD160070BD).

References

1. M. A. Khalighi and M. Uysal, "Survey on free space optical communication: a communication theory perspective," *IEEE Commun. Sur. Tut.* **4**, 2231-2258 (2014).

2. H. Kaushal and G. Kaddoum, "Optical communication in space: challenges and mitigation techniques," *IEEE Commun. Sur.* **19**, 57-96 (2017).
3. H. Kim, Long-term evaluation and analysis of short-reach free-space optical link, Master Degree *Thesis*, Seogang University, Seoul (2004).
4. E. Leitgeb, M. Gebhart, U. Birnbacher, W. Kogler, and P. Schrotter, "High availability of hybrid wireless networks," *Proc. SPIE* **5465** (2004).
5. I. Kim and E. Korevaar, "Availability of free-space optics (FSO) and hybrid FSO/RF systems," *Proc. SPIE* **4530**, 84-95 (2001).
6. A. Prokes, "Atmospheric effects on availability of free space optics systems," *Opt. Eng.* **48**, 066001 1-10 (2009).
7. F. Nadeem, V. Kvicera, M. S. Awan, E. Leitgeb, S. S. Muhammad, and G. Kandung, "Weather effects on hybrid FSO/RF communication link," *IEEE J. Sel. Areas Commun.* **27**, 1687-1697 (2009).
8. J. Turán and L. Ovseník, "Experimental FSO network availability estimation using interactive fog condition monitoring," *Proc. SPIE* **10142**, 1014223 1-16 (2016).
9. A. J. Kshatriya, Y. B. Acharya, A. K. Aggarwal, and A. K. Majumdar, "Estimation of FSO link availability using climatic data," *J. Opt.* **45**, 324-330 (2016).
10. A. A. Basahel, M. R. Islam, S. A. Zabidi, and M. H. Habaebi, "Availability assessment of free-space-optics links with rain data from tropical climates," *J. Lightwave Technol.* **35**, 4282-4288 (2017).
11. I. Kim, B. McArthur, and E. Korevaar, "Comparison of laser beam propagation at 785 nm and 1550 nm in fog and haze for optical wireless communications," *Proc. SPIE* **4214**, 26-37 (2001).
12. M. Ijaz, Z. Ghassemlooy, J. Pesek, O. Fiser, H. Le Minh, and E. Bentley, "Modeling of fog and smoke attenuation in free space optical communications link under controlled laboratory conditions," *J. Lightwave Technol.* **31**, 1720-1726 (2013).
13. M. A. Esmail, H. Fathallah, and M. S. Alouini, "Outdoor FSO communications under fog: attenuation modeling and performance evaluation," *IEEE Photon. J.* **8**, 1-22 (2016).
14. S. Bendersky, N. S. Kopeika, and N. Blaunstein, "Atmospheric optical turbulence over land in Middle East coastal environments: prediction modeling and measurements," *Appl. Opt.* **43**, 4070-4079 (2004).
15. A. A. Farid and S. Hranilovic, "Outage capacity optimization for free-space optical links with pointing errors," *J. Lightwave Technol.* **25**, 1702-1710 (2007).
16. H. Yuksel, S. Milner, and C. Davis, "Aperture averaging for optimizing receiver design and system performance on free-space optical communication links," *J. Opt. Netw.* **4**, 462-475 (2005).