

# 갈릴리안 광학계를 사용한 IM/DD 광무선통신 시스템에서 830[nm] 광파장에 대한 전송거리 제한 해석

(Numerical Study on the Link Range of the IM/DD Wireless Optical Communication at 830[nm] Optical Wavelength using Galilean Optics)

홍권의\* · 고성원 · 조정환

(Kwon-Eui Hong · Sung-Won Ko · Jung-Whan Cho)

## Abstract

In terrestrial wireless optical communication links, atmospheric effects including turbulence, absorption and scattering have significant impact on the system performance. Based on the analysis of transmission in atmospheric channel concerning 830[nm] wavelength diode laser beam, performance of free space optical (FSO) link utilizing Galilean optics as a laser beam transmitting and receiving optics, PIN photodiode as a detecting device. In this paper we designed optical link equation for received optical power and we analyze the atmospheric effects on the signal to noise ratio (SNR) and bit error rate (BER) of an terrestrial FSO system. We show that the possible communication distance for  $BER=10^{-9}$  in proposed adverse atmospheric conditions.

Key Words : Galilean Optics, Laser Diode, Pin Photodiode, Antenna Gain, Link Range, Signal To Noise Ratio, Bit Error Rate

## 1. 서론

지상 대기를 채널로 하는 대기 광무선통신은 새롭게 부상하는 데이터 전송기술이다. 대기 광무선통신은 자유공간 광통신(Free space optical : FSO)이라고도 한다. 이는 지상국과 위성간의 통신인 상향링크, 위성 과 지구국 간의 하향 링크 및 지상국과 지상국간의 통

신으로 구분된다.

지상국간의 통신은 기존의 통신망을 보조하는 보완 시스템으로도 사용할 있으며, 도심의 대형 건물과 건물사이에 데이터를 전송하는 시스템으로 사용하고 또한 광섬유 중단에 설치하여 중단문제를 해결하는데도 사용되고 있다[1-3]. 이러한 자유공간 광통신시스템을 구축하기 위해서는 광송신 및 수신에 필요한 광학계를 필요로 한다. 지상국과 위성간의 광전송에서는 구름과 대기의 상태가 주된 광전송거리에 제한요소가 되며, 지상에서는 안개의 정도에 따라 전송거리에 제한이 발생 한다. 이러한 FSO시스템 중 지상국과 위성 간의 통신에서는 광을 송신 및 수신하는 광학계로 카

\* 주저자 : 김포대학 정보통신과 부교수  
Tel : 031-999-4275, Fax : 031-999-4775  
E-mail : kehong@kimpo.ac.kr  
접수일자 : 2011년 10월 5일  
1차심사 : 2011년 10월 7일, 2차심사 : 2011년 10월 28일  
심사완료 : 2011년 10월 31일

세그리안 구조를 사용한다. 카세그리안 광학계를 사용하는 시스템은 송·수신부의 광학계 구경을 크게 하여 신호의 송수신 시 많은 광을 수신하고, 큰 구경에 의한 구경 평균 효과로 수신광에 대한 대기의 효과를 감소하여 신호의 수신효율을 향상시킬 수 있다. 하지만 근거리(1[km] 미만)에서 건물과 건물 사이에 카세그리안 광학계를 사용한 송수신 시스템은 광학계의 부피가 커 설치 및 운용에 어려움이 발생한다[4-5].

따라서 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 설치 및 운용이 간편한 갈릴리안(Galilean) 광학계를 이용한 광 송수신 시스템을 제안하였다. 이 광학계를 이용한 통신 시스템에서 대기의 상태가 광전송 링크를 통한 데이터 전송에 미치는 영향을 고려하여 광의 파장이 830[nm]인 경우에 한정하여 비트 오류율을 만족하는 전송거리를 유도하였고, 시뮬레이션을 통해 이를 입증하였다.

## 2. 광 송수신 시스템

광신호는 평면파(plane wave)로 가정한다. 광 송수신기에서 link budget은  $P_R = P_T G_T T_T G_R T_R \left(\frac{\lambda}{4\pi z}\right)^2$ 로 설정하며 이것은 RF 통신에서의 정의와 같다[6,7]. 여기서  $G_T$ 는 송신안테나 이득,  $G_R$ 는 수신안테나 이득,  $P_T$ 는 광 송신 전력,  $T_T$ 는 송신 광학계의 전송도(transmissivity),  $T_R$ 는 수신광학계의 전송도를 나타낸다. 그리고  $\lambda$ 는 광의 파장,  $z$ 는 광 송신단과 수신단 간의 거리를 나타낸다. 광 송신 및 수신을 위한 광학계로는 갈릴리안 광학계를 이용하고, 광 송신소자는 파장 830[nm]의 IR 출력 20[mW]의 LD(laser diode)를 사용하고, 수신 소자로는 PIN photodiode를 사용함을 가정한다. 광송신을 위해 LD의 흐르는 전류를 ON/OFF 하는 강도변조를 하고, 광신호의 복조는 직접수신 방식을 취한다.

### 2.1 갈릴리안 광 송신기 및 수신기의 이득

갈릴리안 광 송신기의 직경이  $D_T$ 이고, 전송광의 waist를  $\omega$ 라 할 때, 광 송신기의 안테나 이득은 다음

과 같이 구해진다[7].

$$G_T = \left(\frac{4\pi A}{\lambda^2}\right) \frac{2 \cdot \exp((- \alpha)^2)}{\alpha} \quad (1)$$

식 (1)에서  $\alpha = \frac{D_T}{\omega}$ ,  $A = \pi(D_T/2)^2 [m^2]$ 이다. 송신기와 같은 구경의 갈릴리안 광학계를 수신기로 이용하였을 때 수신안테나의 이득은 다음과 같다.

$$G_R = \left(\frac{4\pi A}{\lambda^2}\right) \cdot \eta_g \quad (2)$$

식 (2)에서  $\eta_g$ 는 다음과 같다.

$$\eta_g = \int_0^{k \frac{A}{2F_s}} \frac{1}{u} (J_1(u))^2 du \quad (3)$$

이며,  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ,  $A$ 는 수신 광학계의 단면적,  $F_s$ 는 광학계의 f 수(f number),  $J_1(\cdot)$ 은 제1종 베셀함수이다.

## 2.2 광 전송에 대한 대기 효과

### 2.2.1 대기에 의한 광 감쇠

대기를 전송 매체로 하는 광무선통신은 대기를 통과할 때 대기의 구성요소인 물 입자, 이산화탄소 등에 의해 광의 흡수가 발생하여 광의 세기가 감쇠한다. 파장에 따른 광의 전송도는 그림 (1)과 같다[8].

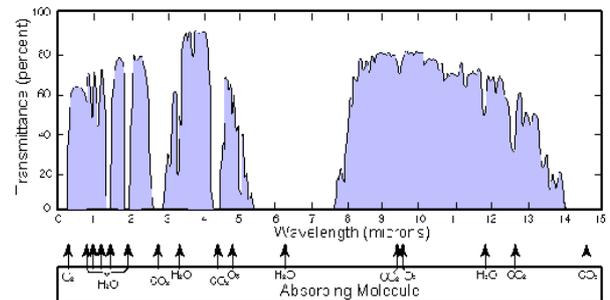


그림 1. 광에 대한 대기 전송도  
Fig. 1. Atmosphere transmissivity for light wavelength

그림 1에서 적외선 대역 중 파장 800[nm]에서 1200[nm]를 보면 약 80[%] 이상의 전송도를 보이며, 이 영역을 이용하기 위해 출력 파장이 830[nm]인 적외선 LD를 송신 광원으로 선정하였다.

이 파장의 광원을 이용하였을 경우 적외선에 대한 transmission window VI에 해당한다. Transmission window VI에서 광을 전송하였을 때, 전송거리에 따른 광의 광쇠는 다음 식으로 정의 된다[8].

$$\tau_{ai} = k_i \cdot \left( \frac{W_i}{W(z)} \right)^{\beta_i} \quad (4)$$

식 (4)에서

$$W(z) = 0.01 \cdot RH \cdot x \cdot z \times \exp(18.9766 - 14.9545x - 2.4388x^2) \quad (5)$$

이고,  $x = \frac{273}{TA}$ ,  $TA$ 는 대기의 절대온도로 273k에 대기 온도를 더한 값,  $RH$ 는 상대 습도이고,  $k_i = 0.872$ ,  $W_i = 0.26$ ,  $B_i = 0.095$ 이다.

### 2.2.2 광전송에 대한 가시도 효과

안개는 가시도의 개념으로 표시한다. 가시도란 매우 모호한 표현으로 이를 명확히 하기위해 Middleton이 사용한 기상학적 가시도를 이용하여 다음과 같이 정의 한다[8].

$$V = \frac{3.91}{\sigma_{scat}} [\text{km}] \quad (6)$$

여기서  $\sigma_{scat}$ 는 대기입자에 의해 발생하는 산란감쇠 계수이다. 안개는 빛을 산란 시키며, 빛의 산란에는 레일리 산란과 Mie 산란이 있다. 이 중 전송광의 파장과 대기 중에 부유해 있는 입자의 크기가 비슷할 때 발생하는 Mie 산란이 광을 가장 많이 산란 시키며, 광신호 감쇠에 큰 영향을 준다. 안개의 입자크기 분포는 표 1와 같다[9-11].

신호광의 파장이 830[nm]인 경우 산란입자의 크기에 따른 상대 산란강도는 그림 2와 같다. 그림 2 (a)는 표 1에서 단위 체적 당 입자의 밀도가 가장 큰 직경

1.4[ $\mu\text{m}$ ]의 안개입자에 대한 산란각에 따른 상대 산란광 강도 분포이다. 그림 2 (b)와 그림 2 (c)는 각각 안개 입자 직경이 0.7[ $\mu\text{m}$ ] 및 0.6[ $\mu\text{m}$ ]에 대한 산란각에 따른 상대 산란광 강도 분포이다.

표 1. 안개의 입자크기 분포  
Table 1. Particle size distribution of Fog

Diameter of Particle([ $\mu\text{m}$ ])	Number of Particles([no./ $\text{cm}^3$ ])
0.4	3
0.6	10
0.7	40
1.4	50
2.0	7
3.6	1
5.4	9
8.0	2

그림 2에서 전송광의 파장과 비슷한 크기의 입자에 의한 산란광의 강도를 산란각에 대해 살펴보았다. Mie 산란에서 대부분의 광이 전방을 진행하고 있음을 확인할 수 있다.

그림 2의 Mie 산란 그래프는 구면(sphere)로부터 산란된 빛의 강도를 산란각  $\theta$ 의 함수로 그린 것으로  $\theta = 0^\circ$ 는 전방 산란,  $\theta = 180^\circ$ 는 후방 산란을 의미한다. 구면으로부터 산란된 광의 세기는 다음의 함수로 정의된다.

$$I = \frac{I_0 F(\theta, \phi)}{k^2 d^2}$$

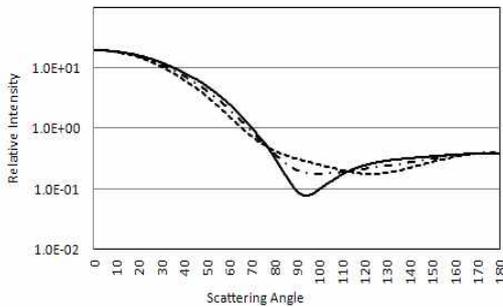
여기서  $I$ 는 산란구면으로부터 거리  $d$ 에서 측정된 산란광의 세기,  $I_0$ 는 입사광의 세기,  $F(\theta, \phi)$ 는  $(\theta, \phi)$  방향에서 산란계수,  $\theta$  산란각,  $k = 2\pi/\lambda$ 이며  $\lambda$ 는 전소광의 파장이다.  $\phi$ 는 azimuth로  $I$ 는  $\phi$ 에 따라 변하지 않는다[11].

광신호가 안개 중을 전파할 때 발생하는 산란 감쇠는  $\exp(-\sigma_{scat} \cdot z)$ 로 표현되며, 산란감쇠  $\tau_v$ 은 다음 식을 유도 된다.

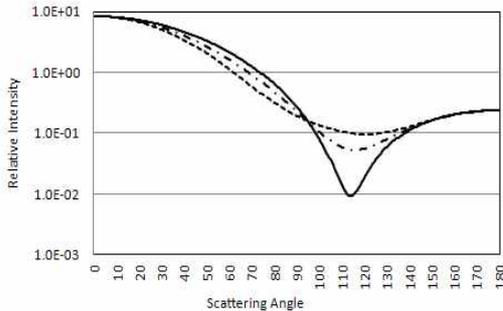
$$\tau_v(z) = e^{-\sigma_{scat} \cdot z} \quad (7)$$



(a) particle diameter = 1.4(μm)



(b) particle diameter = 0.7(μm)



(c) particle diameter = 0.6(μm)

그림 2. 적외선 파장 830(nm)에의 평면파 광에 대한 산란각에 따른 상대 산란 광 강도, (a) d=1.4(μm), (b) d=0.7(μm), (c) d=0.6(μm)의 안개 입자에 의한 산란. 각 그래프에서, 실선 : perpendicular polarization 산란, 점선 : parallel polarization 산란, 일점쇄선 : unpolarized 산란을 나타냄  
 Fig. 2. Relative scattering intensity for Plane wave infrared laser beam with wavelength is 830(nm). (a) d=1.4(μm), (b) d=0.7(μm), (c) d=0.6(μm). Each graph, real line : perpendicular polarization scattering, dotted line : parallel polarization scattering, dash and dotted line : unpolarized scattering

여기서  $z$ 는 광 전송거리이며,  $\sigma_{scat}$ 은 산란감쇠계수를 나타낸다. 따라서 가시도에 따른 산란 감쇠를 나타내는 산란계수의 대수적 표현은 다음과 같다.

$$\sigma_v = \frac{13}{V} \left( \frac{\lambda}{550} \right)^{-q} [dB/km] \quad (8)$$

식 (8)에서  $\lambda$ 는 [nm]로 표시되는 빛의 파장이며,  $q$ 는 실험 데이터에 의해 결정되는 값으로 가시도 6[km] 이내에서는  $q = 0.538 \sqrt[3]{V}$ 이다. 또한, 전송되는 광은 광 송신부에서 수신부에 도달하기 까지 일정한 발산각을 갖고 퍼지면서 진행해 나간다. 이 때 수신되는 전력은 감쇠하게 되며 이는 다음 식으로 정의된다[1].

$$P_L(z) = \frac{A_R}{A_T + \frac{\pi}{4(\theta \cdot z)^2}} \quad (9)$$

여기서  $A_T$ 는 송신 광학계의 단면적,  $A_R$ 은 수신 광학계의 단면적이고,  $\theta$ 는 송신광의 발산각,  $z$ 는 광의 전송거리를 나타낸다.

### 3. 광신호의 수신과 잡음

#### 3.1 수신 전력과 잡음

수신된 광신호의 전기전력은 PIN photodiode 전류의 제곱의 평균에 비례하며 다음과 같이 쓸 수 있다[7].

$$\langle i_{PIN}^2 \rangle = \langle R_o R_R \rangle^2 \quad (10)$$

여기서  $P_R$ 은 광 수신 전력을 나타낸다. 그리고  $R_o = \frac{q\eta\lambda}{hc}$ 로, 이것은 PIN photodiode의 민감도이며,  $\eta$ 는 양자효율,  $q$ 는 전자의 전하량,  $h$ 는 플랑크 상수,  $c$ 는 빛의 속도를 나타낸다. 자유공간을 전파해가는 광신호의 공간손실은 다음 식으로 정의된다[6].

$$L(z) = \left( \frac{\lambda}{4\pi z} \right)^2 \quad (11)$$

식 (1)에서 식 (11)로부터 광 송신단과 수신단의 거리가  $z$ 인 경우 광 수신 전력은 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$P_R = P_T G_T T_T G_R T_R \tau_{ai}(z) (1 - P_L(z)) \tau_v(z) \left( \frac{\lambda}{4\pi z} \right)^2 \quad (12)$$

식 (12)로 유도된 수신 광신호는 광신호가 자유공간을 전파해 가는데서 오는 자유공간 전파손실 이외에도 대기의 흡수에 의한 손실, 가시도에 따른 손실, 광의 발산에 의한 손실이 발생하여 수신광의 세기에 감쇠가 발생한다.

광신호를 PIN photodiode를 사용하여 수신하였을 때 다음과 같이 수신기에서 발생하는 잡음과 배경의 복사에 의한 잡음이 수신기의 성능을 저하시킨다. 이를 포함한 총 잡음은 다음과 같이 구해진다[7,12].

$$\sigma_N^2 = \sigma_{SN}^2 + \sigma_{TH}^2 + \sigma_{BG}^2 \quad (13)$$

여기서  $\sigma_{SN}^2$ 은 신호 산탄 잡음 전력,  $\sigma_{TH}^2$ 는 열잡음 전력,  $\sigma_{BG}^2$ 는 배경 잡음 전력을 나타낸다. 신호 산탄 잡음에 의한 잡음전력은 다음과 같다.

$$\sigma_{SN}^2 = 2qR_o P_R M B_W \quad (14)$$

열에 의한 잡음전력은 다음과 같다.

$$\sigma_{TH}^2 = \frac{4k_B T B_W F_T}{R_{eq}} \quad (15)$$

배경 잡음 전력은 다음과 같다.

$$\sigma_{BG}^2 = 2qR_o B_G M B_W \quad (16)$$

식 (14)에서 식 (16)까지에서  $k_B$ 는 볼츠만상수,  $B_W$ 는 대역폭,  $R_{eq}$ 는 회로 등가 저항,  $F_T$ 는 회로의 잡음지수이며,  $T$ 는 절대 온도이다. 식 (16)에서  $B_G$ 는 배경 복사 전력으로  $B_G = H \cdot \pi \cdot FOV^2 \cdot A_R \cdot \Delta\lambda \cdot T_R$  [8]로 계산된다.  $H$ 는 태양 복사에 대한 계수,  $FOV$ 는 수신기의 field of view이며,  $A_R$ 은 수신 광학계의 단면적,  $\Delta\lambda$ 는 광학 필터의 통과 대역폭,  $T_R$ 는 수신 광학계의 transmittance를 나타낸다.

광 수신 회로에서 발생하는 잡음 중 신호 산탄 잡음, 열잡음 및 배경잡음이 주된 잡음원이라고 가정하면 수신 광에 대한 신호 대 잡음비는 다음과 같이 구해진다[12-13].

$$SNR = \frac{(R_o P_R M)^2}{2qR_o P_R M B_W + 4k_B T B_W F_T / R_{eq} + 2qR_o B_G M B_W} \quad (17)$$

PIN photodiode를 광 수신 소자로 사용하는 경우, 식 (17)에서 수신 소자 자체에서 신호의 증폭이 이루어지지 않으므로  $M=1$ 로 한다.

### 3.2 비트 오류율

IM/DD 시스템에서 잡음의 분포가 가우시안 형태로 가정하면, 신호의 판정 레벨은 평균 신호 레벨의 절반이 된다. 신호의 레벨을  $I$ 라고 할 때 “1”의 오류는 신호평균 레벨과 잡음( $i_N$ )의 합이  $I/2$ 보다 작은 경우 즉,  $I + i_N < I/2$ 이며, 이는  $i_N < -I/2$ 인 경우에 발생하고, “0”의 오류는 수신기의 잡음이  $i_N > I/2$  일 때 발생한다. 그러므로 전체 오류확률은 다음과 같이 구할 수 있다[14].

$$BER = \frac{1}{2} (p_{one} + p_{zero}) \quad (18)$$

$$= \frac{1}{2} [p(i_N < -I/2) + p(i_N > I/2)]$$

수신기 잡음이 가우시안 분포를 하고 있을 때, 잡음( $i_N$ )이 정해진 레벨  $i_s$ 보다 작을 확률은 다음과 같다.

$$P(i_N \leq i_s) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{i_s} e^{-x^2/2\sigma^2} dx \quad (19)$$

식 (17)에서 식 (19)를 이용하면 전체 비트 오류율은 다음과 같이 유도된다.

$$BER = \frac{1}{2\sigma \sqrt{2\pi}} \left( \int_{-\infty}^{-I/2} e^{-x^2/2\sigma^2} dx + \int_{I/2}^{\infty} e^{-x^2/2\sigma^2} dx \right) \quad (20)$$

$$= \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{1}{2\sqrt{2}} \sqrt{SNR} \right) + \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{1}{2\sqrt{2}} \sqrt{SNR} \right) \right]$$

$$= \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{1}{2\sqrt{2}} \sqrt{SNR} \right)$$

### 4. 전송신호 SNR 및 BER

신호를 전송하는 광원으로는 출력 20[mW], 출력과장 830[nm]의 적외선 LD를 사용함을 가정하였으며 이는 대기의 IR transmission window VI를 이용한다. 광 수신 전력은 대기 중의 입자들에 의한 광의 감쇠, 가시도 따른 광의 감쇠 및 자유공간에서의 광의 감쇠항을 포함한다. 광을 송신 및 수신하는 광학계로는 Galilean 광학계를 사용하는 것으로 가정하여 쉽게 광 전송시스템을 구축할 수 있도록 하였다. 광 수신 전력을 구하기 위한 변수는 표 2와 같다.

표 2의 값 및 식 (12)를 이용하여 가시도 0.5[km], 1[km], 3[km], 5[km]에 대한 광 수신 전력을 구하고, 식 (17) 및 식 (20)을 이용한 SNR[dB/m] 및 BER은 그림 3 및 그림 4와 같다.

표 2. 광 송수신을 위한 변수 설정 값  
Table 2. Parameter for light transmit and receive

변 수	값	비 고
TT	0.5	광 송신기 손실
TR	0.5	광 수신기 손실
DT	0.81[m]	광 전송안테나 직경
DR	0.81[m]	광 수신안테나 직경
$\lambda$	830[nm]	LD 출력과장
PT	20[mW]	LD 출력
$\eta$	0.8	PIN diode 양자효율
BW	100[MHz]	대역폭
FT	3[dB]	잡음지수
T	290[k]	온도
Req	50[k $\Omega$ ]	회로 등가저항

그림 3에서 전송거리 0.5[km]까지는 가시도에 따라 SNR은 거의 차이를 보이지 않으나 전송거리가 1[km]을 넘어서면 가시도에 따라 SNR이 크게 차이 날 수 있다. -50[dB]를 최소 SNR이라 한다면 가시도 V=0.5[km]에서는 약 1.5[km]까지, 가시도 V=1[km]에서는 약 1.7[km]까지, 가시도 V=3[km] 이상에서는 약 10[km] 이상에서도 신호광의 수신이 가능하다.

또한 데이터 전송의 품질의 하한을 BER=10<sup>-9</sup>로 하면 가시도 V=0.5[km]에서는 약 1.2[km]까지, 가시도 V=1[km]에서는 약 2[km]까지, 가시도 V=3[km]에서

는 약 4.5[km]까지, 가시도 V=5[km]에서는 약 6.2[km]까지 통신이 가능하다.

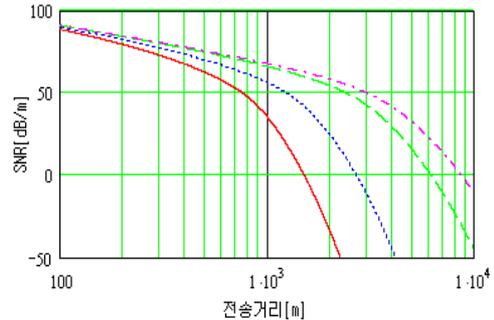


그림 3. 가시도 및 전송거리에 따른 SNR. 실선 : V=0.5(km), 점선 : V=1(km), 데시 : V=3(km), 일점쇄선 : V=5(km)

Fig. 3. SNR for Visibility and light transmission distance. real line : V=1(km), dot line : V=1(km), dash line : V=3(km), dash and dot line : V=5(km)

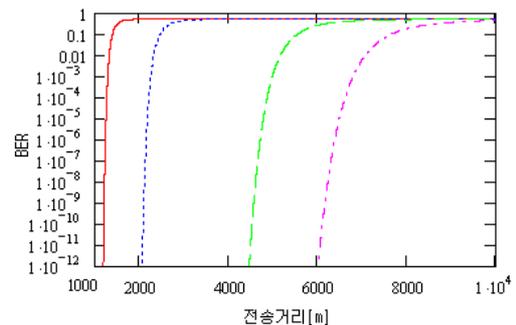


그림 4. 가시도 및 전송거리에 따른 BER. 실선 : V=0.5(km), 점선 : V=1(km), 데시 : V=3(km), 일점쇄선 : V=5(km)

Fig. 4. BER for Visibility and light transmission distance. real line : V=1(km), dot line : V=1(km), dash line : V=3(km), dash and dot line : V=5(km)

### 5. 결 론

본 논문에서는 근거리 광무선 통신 시스템에 사용하기 위하여 설치가 간편한 갈릴리안 광학계를 적용하였다. 이의 효율성을 입증하기 위하여, 자유공간에서의 광의 감쇠, 포인팅 손실, 안개의 정도에 따른 가시도가 광무선통신의 성능에 미치는 영향을 수치해석을

통하여 유도하였다.

즉 광과장 830[nm]의 레이저 다이오드를 사용한 근거리 광무선 통신에 대한 해석을 위해 가시도 6[km] 이내의 경우에 한정하여 시뮬레이션 하였으며, 그 결과 데이터 전송의 품질의 하한을 BER=10<sup>-9</sup>로 설정하면 가시도 0.5[km]에서는 약 1.2[km]까지, 가시도 1[km]에서는 약 2[km]까지, 가시도 3[km]에서는 약 4.5[km]까지, 가시도 5[km]에서는 약 6.2[km]까지 통신이 가능함을 확인할 수 있었다.

따라서 지상 광무선 통신 시스템을 구축하는 경우에 갈리리안 광학계를 도입하여 광 송신 및 수신 광학계를 작은 크기로 설계할 수 있으며, 이러한 광학계를 이용한 시스템이 가시도가 낮은 경우도 양호한 통신의 품질을 구현할 수 있어 근거리 광무선통신에 적용할 수 있을 것이다.

앞으로의 연구과제는 본 논문에서 제안한 내용을 설계 제작하여 입증하고, 또한 통신시스템의 중단 문제의 해법을 제시하고자 한다.

본 논문은 2011학년도 김포대학 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

## References

[1] DeBie Kedar and Shlomi Arnon, "Optical wireless communication through fog in the presence of pointing error," Applied Optics, Vol. 42, No. 24/ pp. 4946 - 4954, 20 August 2003.

[2] Isaac I. Kim, Bruce McArthur, and Eric Korevaar "Comparison of Laser Beam propagation at 785(nm) and 1550(nm) in Fog and haz for optical wireless communications," Proceeding SPIE, 4214, p26~p37. 2001.

[3] Urachada Ketprom and Akira Ishimaru et al, "Channel modeling for optical wireless communication through dense fog," Journal of optical networking, Vol. 4, No. 6/ pp. 291 - 299, June 2005.

[4] Shlomi Arnon, "Optical Wireless Communication," Encyclopedia of Optical Engineering P1866~p1886. 2003

[5] Scott Bloom, Eric Korevaar, John Schuster, Heinz Willebrand, "Understanding the performance of free-space optics(Invited)" June 2003/ Vol. 2, No 6/ pp 178-200. JOURNAL OF OPTICAL NETWORKS.

[6] Haim Manor and Shlomi Arnon, "Performance of an optical wireless communication as a function of wavelength," Applied Optics, Vol. 42, No. 21/ pp. 4285 -

4294, 20 July 2003.

[7] Morio Toyoshima and Walter R. Leeb etc, "Comparison of microwave and light wave communication systems in space applications," Optical engineering, 46(1), 015003/ pp. 1 - 7, January 2007.

[8] Gray Waldman John Wootton "Electro-Optical System Performance Modeling," Artech House Boston London, 1993.

[9] Sermsak Jaruwatanadilok, Urachada Ketprom, Yasuo Kuga, and Akira Ishimaru, "Modeling the point-to point Wireless communication Channel under the adverse Weather conditions," IEICE TRANS. ELECTRON, Vol. E87-C, No. 9/ pp. 1455 - 1462, September 2004.

[10] Urachada Ketprom and Akira Ishimaru et al, "Numerical studies on time-domain responses of on-off keyed modulated optical signals through a dense fog," Applied Optics, Vol. 43, No. 2/ pp. 496 - 505, January 2004.

[11] Philip Laven, "Simulation of rainbows, coronas, and glories by use of Mie theory," Applied Optics, Vol. 42, No. 3/ pp. 436 - 444, 20 January 2003.

[12] Jayasri Akella etc, "Solar Building blocks for mobile free-space-optical networks," Rensseler Polytechnic Institute.

[13] Vladimir G. Sidorovich, "Solar background effects in wireless optical communications," Sunflower Technologies Limited.

[14] Heba Yuksel, "Studies of the effects of atmospheric turbulence on free space optical communications," University of Maryland, 2005.

## ◇ 저자소개 ◇



### 홍권의 (洪權義)

1959년 10월 13일. 1982년 건국대학교 공과 대학 졸업. 1984년 건국대학교 대학원 졸업(석사). 1997년 건국대학교 대학원 졸업(박사). 1984~1991년 대우중공업 중앙연구소 연구원. 1991~1997년 종로산업학교. 1997년~현재 김포대학 정보통신과 부교수.



### 고성원 (高成元)

1960년 8월 6일생. 1983년 한양대학교 전자공학과 졸업. 1985년 한양대학교 대학원 전자공학과 졸업(석사). 2008년 숭실대학교 대학원 전자공학과 졸업(박사). 1986~1995년 한국통신 통신망 연구소 전임연구원. 1997년~현재 김포대학 IT학부 부교수.



### 조정환 (趙正煥)

1963년 12월 12일생. 1988년 한양대학교 전자공학과 졸업. 1990년 한양대학교 대학원 전자공학과 졸업(석사). 2003년 한양대학교 대학원 전자공학과 졸업(박사). 현재 김포대학 IT학부 부교수. 산업계측 제어기술사. 본학회 편수위원.