

카세그레인 광학계를 사용한 광무선통신 시스템에서 550[nm], 850[nm] 및 1550[nm]의 광 파장에 대한 안개 및 포인팅 에러의 영향에 대한 해석

(Numerical Study on the Wireless Communication at 550[nm], 850[nm] and 1550[nm] Wavelength LD in Fog and Pointing Error using Cassegrain Optics)

홍권의*

(Kwon-Eui Hong)

요 약

안개 및 대기의 교란이 광무선 통신에 주는 영향을 해석하기 위해 가시광선영역의 LD(laser diode) 및 적외선 영역의 LD 사용하고, 카세그레인 광학계를 이용하여 광을 송수신하게 하였으며, 광 소신소자로는 APD(avalanch photo diode)를 사용함을 가정하여 대기 중의 안개의 정도에 따른 가시도 및 교란의 세기를 나타내는 굴절률 구조 상수에 따른 광 수신 전력, 잡음 전력을 고려한 SNR(signal to noise ratio)을 계산해 보고 각각의 통신 상태에서 BER(bit error rate)이 10^{-9} 이 가능한 통신 거리를 알아보았다.

Abstract

Atmospheric effects on laser beam propagation can be broken down into two categories: attenuation of the laser power and fluctuation of laser power due to laser beam deformation. Attenuation consists of scattering of the laser light photons by the fog. Laser beam deformation occurs because of small-scale dynamic changes in the index of refraction of the atmosphere. This causes pointing error. In order to analyse these effect on optical wireless communication system, in this paper uses cassegrain optics as a transmitting and receiving telescope, APD as a detecting device and LD as a light source. The signal modulating and demodulating method is a IM/DD. I show the effects of fog and pointing error and calculate the possible communication distance for BER is 10^{-9} .

Key Words : Cassegrain Optics, LD, APD, Antenna Gain, SNR, BER

* 주저자 : 김포대학교 정보통신과 부교수
Tel : 031-999-4275, Fax : 031-999-4775
E-mail : kehong@kimpo.ac.kr
접수일자 : 2008년 10월 28일
1차심사 : 2008년 10월 30일
심사완료 : 2008년 11월 24일

1. 서 론

기존의 건물 간에 새로이 광섬유를 이용한 통신설
 로를 개설하기는 설치 기간 및 많은 비용이 든다.

이러한 경우 한 건물에서 멀지 않은 건물 사이의
 통신 시스템으로 여러 가지를 고려할 수 있으나 그
 중 가격 및 성능 면에서 볼 때 대기를 채널로 하는
 광무선 시스템의 설치가 가장 유리하다 할 수 있다.
 그러나 대기를 채널로 하는 시스템은 대기의 속성이
 매우 불규칙하게 변화하기 때문에 어려움이 발생하
 다. 맑은 날의 대기는 대기 교란현상이 발생하여 통
 신에 영향을 주나, 이러한 경우는 영향이 아주 작아
 수[km]까지 아주 높은 통신속도를 유지하며 낮은
 BER로 통신이 가능하다. 그러나 안개의 경우는 안
 개의 가시도에 따라 통신속도에 많은 영향을 줄 수
 있다. 또한 대기의 교란은 광무선 통신의 성능을 저
 하시킨다[1-3].

본 논문에서는 대기 중 안개 및 포인팅 에러가 있
 는 경우에 대해 카세그레인 광학계를 광 송신 및 수
 신 광학계로 이용하고, 가시광선 영역 및 적외선 영
 역의 LD를 송신 소자로, APD를 수신소자로 하는
 IM/DD(intensity modulation/direct detection) 통신
 시스템을 사용하였을 때 대한 시스템의 성능을 평
 가해 보았다.

2. 광 송수신 시스템

광신호는 가우시안 광강도 분포를 갖고 있으며
 TEM₀₀라 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 정의하며 이것은 RF 통
 신에서의 정의와 같다[4-6]. 여기서 G는 안테나 이
 득, P는 전력, T는 광학적 전송도(transmissivity)를
 나타내며, 첨자 T는 광 송신기, R은 광 수신기를 나
 타낸다. 그리고 첨자 A는 대기를 나타내며, z는 광
 송신단과 수신단간의 거리를 나타낸다. 광 송신 및
 수신을 위한 광학계로는 카세그레인 광학계를 이용
 하고, 광 송수신 소자로는 APD를 사용한다. 광 송신
 을 위해 LD의 흐르는 전류를 ON/OFF 하는 강도변
 조(IM)를 하고, 광신호의보조는 직접복조(DD) 방식

을 취한다.

2.1 카세그레인 광 송신기

카세그레인 광 송신기는 a로 정의되는 1차 반사경
 의 반경과 b로 정의되는 2차 반사경 설명할 수 있다.
 광원인 레이저 다이오드 출력 광의 waist를 ω , 곡률
 을 R이라 할 때, 광 송신기의 이득은 다음과 같다
 [4,7].

$$G_T(\alpha, \beta, \gamma, X) = \left(\frac{4\pi A}{\lambda^2}\right) g_T(\alpha, \beta, \gamma, X) \quad (1)$$

여기서, $\alpha = \frac{a}{\omega}$, $\gamma = \frac{b}{a}$, $X = k a \sin \theta_1$, $A = \pi a^2 [m^2]$ 이
 고 $\beta = \frac{k a^2}{2} \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{R}\right)$ 이다. 광 송신 및 수신 단이 서로
 동축이고, 충분히 거리만큼(far field) 떨어져 있다면
 g_T 는 다음 같이 쓸 수 있다.

$$g_T(\alpha, 0, \gamma, 0) = \frac{2}{\alpha^2} [e^{-\alpha^2} - e^{-(\alpha \cdot \gamma)^2}]^2 \quad (2)$$

식 (2)를 이용하면 식 (1)의 광 송신기의 이득은
 다음 식으로 구해진다.

$$G_T(\alpha, 0, \gamma, 0) = \frac{4\pi A}{\lambda^2} \frac{2}{\alpha^2} [e^{-\alpha^2} - e^{-(\alpha \cdot \gamma)^2}]^2 \quad (3)$$

2.2 카세그레인 광수신기

카세그레인 광학계를 이용한 광수신기는 광학계
 의 구조에 의해 중앙 가림(central obscuration)과
 spill over가 발생한다. 수신 안테나의 이득에는 이러
 한 요소를 고려해야 한다. 수신 안테나의 이득을 다
 음과 같다[4,8].

$$G_R = \frac{4\pi A}{\lambda^2} (1 - \gamma^2) \eta \quad (4)$$

여기서 $\gamma = b/a$ 로 b는 2차 반사경의 반경, a는 1차
 반경의 반경이다. η 는 광학계의 효율이며, A는 1차
 반사경의 면적으로 $A = \pi a^2 [m^2]$ 이다.

광 수신 안테나의 이득에 대한 식 (4)의 우측 첫 항은 이상적인 안테나의 이득을 나타내며, 두 번째 항은 중앙 가림의 영향을 고려한 항이고, 마지막 항은 광 수신소자의 크기의 제한에 의해 발생한 광 에너지의 손실을 나타낸 것이다.

광학계의 효율은 직접 수신인 경우 다음과 같다.

$$\eta = \frac{2}{(1-\gamma^2)} \int_0^{kR_D/F_s} \frac{1}{u} (J_1(u) - \gamma J_1(\gamma u))^2 du \quad (5)$$

여기서 F_s 는 광학계의 f 수(구경 대 초점거리의 비), R_D 는 광 수신소자의 반경, $k=2\pi/\lambda$ 이다.

2.3 광 전송에 대한 포인팅 에러

대기 효과에 의해 광은 포인팅 에러를 갖게 되어 수신 단에서 전력의 감소가 발생한다. 광무선 링크에서 신호가 수신될 때, 신호 광이 수신기에 정확히 입사되어야 보다 높은 통신 성능을 기대할 수 있다. 그러나 대기 교란의 효과에 의해 광은 원래의 방향과 일치하지 않은 방향으로 진행될 수 있다. 실제의 광 무선통신에서는 이와 같은 포인팅 에러가 발생한다. 포인팅 에러(Ψ_e)는 다음과 같다.

$$\Psi_e(z) = \frac{\lambda}{2\sqrt{2}r_i(z)} \quad (6)$$

식 (6)에서 $r_i = [0.423 \cdot k^2 \cdot L \cdot C_n^2]^{-3/5}$ 이고, $k=2\pi/\lambda$, C_n^2 은 교란강도를 나타내는 굴절률 구조상수이다. 이로부터 포인팅 에러로 인한 포인팅 손실은 다음과 같다.

$$P_E(z)_{dB} = 20 \log \left\{ \frac{1}{1 + [2\Psi_e(z)/\Psi_0]} \right\} \quad (7)$$

여기서 빔 폭(Ψ_0)은 광 송신을 위한 송신부의 개구 직경(D)과 다음의 관계를 갖는다.

$$\Psi_0 = 1.27 \frac{\lambda}{D} \quad (8)$$

대기교란의 강도는 굴절률 구조상수 C_n^2 의 값에

따라 정의할 수 있으며, 강교란 시는 $C_n^2 \approx 10^{-12}$ 의 값을 보이며 약교란 시는 $C_n^2 \approx 10^{-15}$ 정도의 값을 보인다[9].

2.4 광 전송에 대한 안개의 효과

신호 광이 대기를 통해 전송될 때 감쇠되는 전력은 Beers-Lambert 법칙[2]으로 설명되며 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\tau(z) = P(z)/P(0) = e^{-\alpha z}$$

여기서, z 는 전송거리, $P(z)$ 은 전송거리 z 에서 광의 전력, $P(0)$ 은 광원의 전력이며, σ 는 단위 길이 당 감쇠계수(attenuation coefficient)이다. 감쇠계수는 안개와 대기입자들에 의한 광의 흡수 및 산란에 기인한다. 감쇠는 산란에 의한 감쇠가 주된 요소이며, 산란의 형태는 전파해기는 광의 파장에 대한 입자의 크기에 의해 결정된다. 이는 차원이 없는 크기 계수 α 로 다음과 같이 정의 된다.

$$\alpha = 2\pi r/\lambda$$

여기서, r 은 산란입자의 반경, λ 는 광의 파장이다. 표 1은 산란입자의 종류에 따른 크기 계수 α 를 보여 준다.

표 1. 공기입자와 크기 계수 α
Table 1. atmospheric particle and size parameter α

형태	반경 ([μm])	크기계수 α		
		550[nm]	850[nm]	1,550[nm]
공기분자	0.0001	0.001	0.0007	0.0004
연무입자	0.01~1	0.1~11	0.07~7	0.04~4
안개방울	1~20	11~228	7~148	4~81
비	100~10,000	1,142	739	405
		~114,200	~73,920	~40,540
눈	1,000~5,000	11,420	7,392	4054
		~57,120	~36,960	~20,270

표 1은 대기 중의 산란입자들의 반경을 보여 준다. 여기서 입자의 반경이 광의 파장보다 아주 작은 공

기분자의 경우는 Rayleigh 산란에 속하며 이때 감쇠계수는 λ^{-4} 에 비례한다. 입자의 반경이 광의 파장보다 아주 큰 비나 안개의 경우 산란계수는 λ^0 에 비례하고, 산란입자의 반경이 $r \approx \lambda$ 인 경우 즉, 크기계수 α 가 0.1~50인 경우는 Mie 산란에 속하며, 감쇠계수는 $\lambda^{-1.6} \sim \lambda^0$ 에 비례하는 값을 갖는다. 안개는 다음과 같이 분류된다.

안개는 수증기가 기층 중에 응결하여, 아주 작은 물방울이 되어 대기의 밀층(고도 100[m] 이내)에 떠돌고 있는 현상을 말한다. 이 같은 안개는 지면이 복사로 인하여 냉각되면 지면에 접한 공기도 냉각되어 기층중의 수증기가 응결하여 안개가 되며, 이러한 안개를 복사무라 부른다. 대부분의 안개는 복사무이며, 이 안개는 농도가 가장 짙다. 안개는 공기가 수평이동을 할 때도 발생한다. 이러한 안개는 바다나 해안가에 잘 생기는 안개로 바다위의 비교적 따뜻한 공기가 유상으로 이동할 때 또는 난류상의 공기가 한류로 흐를 때 발생하며 이를 이류무라한다. 또 다른 안개는 강이나 호수 위에 잘 발생하는 안개로 찬 공기가 비교적 온도가 높은 물위를 지나갈 때 수면으로부터 증발된 수증기가 응결되어 발생하는 안개로 이를 증발무라한다. 안개는 불확실한 가시도(visibility)가 안개의 특징이기 때문에 가시도의 개념으로 표시한다. 가시도란 매우 모호한 표현으로 이를 명확히 하기위해 Middleton이 사용한 기상학적 가시도를 다음과 같이 정의한다[2].

$$V = \frac{3.91}{\sigma_{scat}} [\text{km}] \quad (9)$$

여기서, σ_{scat} 는 대기입자에 의해 발생하는 산란 감쇠계수이다.

안개는 빛을 산란시키며, 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 산란시키며, 광 신호를 감쇠한다.

광신호가 안개 층을 전파할 때 발생하는 산란 감쇠는 $\exp(-\sigma_{scat} \cdot z)$ 로 표현되며, 산란감쇠 L_{scat} 은 다음 식을 유도된다.

$$L_{scat} = 10 \log e^{-\sigma_{scat} \cdot z} = -\sigma_{scat} \cdot z \cdot 10 \log e \\ = -10 \log e \cdot \sigma_{scat} \cdot z [\text{dB}] \quad (10)$$

여기서 z 광 전송거리이며, σ_{scat} 은 산란감쇠계수를 나타낸다.

따라서 전송거리(z) 1[km]에 대한 산란 감쇠를 나타내는 산란계수의 대수적 표현인은 다음과 같다.

$$\sigma_{scat} [\text{dB/km}] = 10 \log e \cdot \sigma_{scat} [\text{dB/km}] \quad (11)$$

전송 광이 안개를 통해 전파해 갈 때는 안개에 의한 광의 감쇠를 고려해야 하며, 안개에 따른 감쇠는 가시도를 고려할 때 감쇠계수($\sigma_{f[\text{dB/km}]}$)는 다음과 같다.

$$\sigma_{f[\text{dB/km}]} = \frac{10 \log e \cdot (3.91)}{V} \left(\frac{0.55}{\lambda} \right)^q [\text{dB/km}] \quad (12)$$

여기서 q 는 실험 데이터에 의해 결정되는 값으로 가시도에 따라 다음과 같은 값을 갖는다.

가시도가 50[km] 이상인 경우는 1.6, 가시도의 평균이 6[km] 이상 50[km] 미만인 경우는 1.3, 연무(haze)인 경우 가시도 1[km] 이상 6[km] 미만인 경우는 0.16[V]+0.34, 박무(mist)인 경우 가시도 0.5[km] 이상 1[km] 미만인 경우는 V-0.5, 안개의 경우 가시도 0.5[km] 미만인 경우는 0이다[10].

3. 광신호의 수신과 잡음

수신된 광신호의 전기전력은 APD 전류의 제곱의 평균에 비례하며 다음과 같이 쓸 수 있다[11-12].

$$\langle i_{APD}^2 \rangle \geq \langle R_o R_R M \rangle^2 \quad (13)$$

여기서 P_R 은 광 수신 전력을 말한다. 그리고 $R_o = \frac{\eta q \lambda}{hc}$ 로 이것은 APD의 민감도이며, M 은 APD의 이득, η 는 양자효율, q 는 전자의 전하량, h 는 플랑크 상수, c 는 빛의 속도이며, τ_T 는 광 송신기의 전송 손실, τ_R 은 광 수신기의 전송손실을 나타낸다. 또한 자유공간을 전파해가는 광신호의 공간손실은 다음 식으로 정의된다[10].

카세그레인 광학계를 사용한 광무선통신 시스템에서 550[nm], 850[nm] 및 1550[nm]의 광 파장에 대한 안개 및 포인팅 에러의 영향에 대한 예측

$$L(z) = \left(\frac{\lambda}{4\pi z} \right)^2 \quad (14)$$

위의 식들로부터 광 송신단과 수신단의 거리가 z 인 경우 광 수신 전력은 다음과 같다[11-12].

$$P_R = P_T G_T \tau_T G_R \tau_R \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \left(\frac{1}{z} \right)^2 \quad (15)$$

식 (15)에서 광 수신 전력은 광전송거리의 제곱에 반비례함을 알 수 있다.

광 신호는 APD를 사용하는 경우 높은 광전류이득을 얻을 수 있으나 다음과 같이 잡음이 수신기의 성능을 저하시킨다. 총 잡음은 다음과 같다[13].

$$\sigma_N^2 = \sigma_{DC}^2 + \sigma_{SN}^2 + \sigma_{surf}^2 + \sigma_{TH}^2 \quad (16)$$

여기서 σ_{DC} 는 암전류 잡음, σ_{SN} 은 신호 산탄 잡음, σ_{TH} 는 열잡음을 나타낸다. 신호 산탄 잡음에 의한 잡음전력은 다음과 같다.

$$\sigma_{SN}^2 = 2qR_o P_{R(eq)} M^{x+2} B_w \quad (17)$$

표면 누설 전류에 의한 잡음전력은 다음과 같다.

$$\sigma_{surf}^2 = 2qI_L B_w \quad (18)$$

여기서 I_L 은 표면 누설 전류이다.

열에 의한 잡음전력은 다음과 같다.

$$\sigma_{TH}^2 = \frac{4k_B T B_w F_T}{R_{eq}} \quad (19)$$

암전류에 의한 잡음 전력은 다음과 같다.

$$\sigma_{DC}^2 = 2qI_D M^{x+2} B_w \quad (20)$$

식 (17)에서 식 (20)까지에서 I_D 는 암전류, k_B 는 볼츠만상수, B_w 는 등가 잡음 대역폭, R_{eq} 는 회로 등가 저항, F_T 는 회로의 잡음지수이며, T 는 절대 온도이다. $F(M) \approx M^x (0 \leq x \leq 1)$ 로 이것은 초과 잡음 인자(excess noise factor)이다. APD는 신호의 증폭과

정에서 부가적 잡음이 발생한다. 이로 인한 초과 잡음 요소는 다음과 같다.

$$F(M) = M \left[1 - \left(1 - \frac{1}{k_{eff}} \right) \frac{(M-1)^2}{M^2} \right] \quad (21)$$

여기서 M 은 APD의 증배값이고, k_{eff} 는 이온화 인자이다. 위의 식으로부터 광통신 시스템의 SNR은 다음과 같이 구해진다.

$$SNR = \frac{(R_o P_R M)^2}{2q(R_o P_R + I_D) M^{x+2} B_w + 2qI_L B_w + 4k_B T B_w F_T / R_{eq}} \quad (22)$$

APD 사용한 광통신 시스템의 전송거리에 따른 SNR을 계산하기 위해 각 변수를 표 2와 같이 설정한다.

비트 판정을 하는 회로에서 최대 posteriori 확률 기준을 사용한다. 그리고 2진수 "0"에 대해서는 전송되는 전력이 없다고 가정하면 BER은 다음 식으로 정의된다[14].

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\sqrt{SNR}}{2\sqrt{2}} \right) \quad (23)$$

여기서 $\operatorname{erfc}(x)$ 는 다음 식으로 정의되는 보 에러 함수이다.

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty \exp(-y^2) dy \quad (24)$$

4. 파장에 따른 수신전력, SNR 및 BER 계산

광의 파장 및 대기상태에 따른 SNR 및 BER을 계산하기 위해, 광원으로는 출력파장이 550[nm], 850[nm] 및 1,550[nm]의 LD를 사용하는 것을 가정하였고, 출력은 가우시안 형태이며, 광 출력은 5[mW]로 하였다. 수신소자는 APD를 이용하며, 광 송수신 광학계는 카세그레인 광학계를 사용하였다. 망원경의 직경은 240[mm], 부경의 직경은 10[mm], 초점거리는 1,000[mm]로 하였다.

식 (7), 식 (12)와 식 (22)로부터 안개 및 포인팅에

러가 있는 상태에서 전송 광 파장과 전송 거리 및 교란의 세기에 따른 수신전력 그림 1과 같다. 안개는 가시도로 규정되며, 포인팅에러는 대기교란의 세기를 나타내는 굴절률 상수에 따라 달라진다.

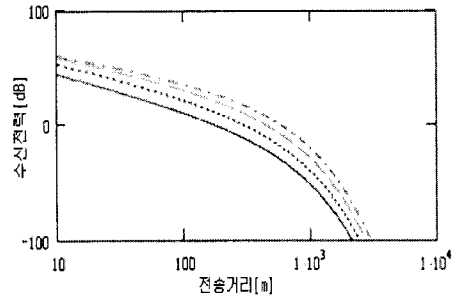
표 2. 광 송수신을 위한 변수 설정 값
Table 2. the parameter for light transmit and receive

변 수	값	비 고
τ_T	0.5	광 송신기 손실
τ_R	0.5	광 수신기 손실
DT	0.24[m]	광 전송안테나 직경
DR	0.24[m]	광 수신안테나 직경
λ	850[nm]	LD 출력파장
PT	5[mW]	LD 출력
η	0.6	APD 양자효율
x	0.5	초과 잡음 변수
ID	0.05[nA]	암전류
IL	0[A]	누설전류
BW	25[MHz]	대역폭
FT	3[dB]	잡음지수
T	290[k]	온도
Req	50[k Ω]	회로 등가저항

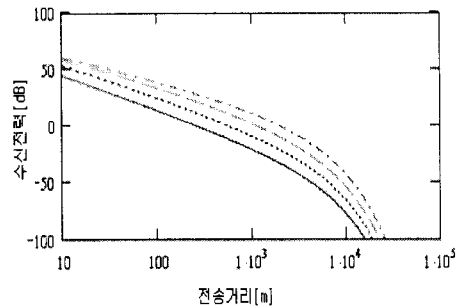
그림 1은 가시도가 0.5[km], C_n^2 가 10^{-12} , 10^{-13} , 10^{-14} 및 10^{-15} 이고 (a)는 $\lambda=550$ [nm], (b)는 $\lambda=850$ [nm], (c)는 $\lambda=1,550$ [nm]일 때이다.

그림 1에서 수직축은 수신전력의 [dB]값으로 식 (15)에서 포인팅 에러에 의한 전력의 손실 및 가시도에 따른 수신전력의 감쇠를 고려한 것으로, 가시도가 0.5[km]까지는 파장에 따른 수신전력의 감쇠는 차이가 거의 없음을 볼 수 있다. 그림 2는 가시도 6[km]인 경우의 수신전력으로, C_n^2 가 10^{-12} , 10^{-13} , 10^{-14} 및 10^{-15} 이고 (a)는 $\lambda=550$ [nm], (b)는 $\lambda=850$ [nm], (c)는 $\lambda=1,550$ [nm]일 때이다.

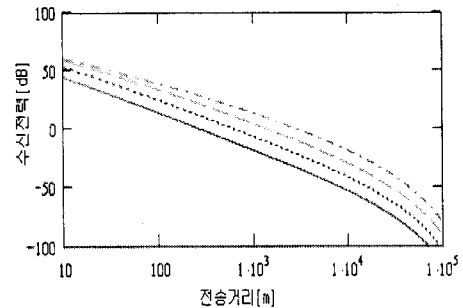
그림 2에서 수직축은 수신전력의 dB값으로 식 (15)에서 포인팅 에러에 의한 전력의 손실 및 가시도에 따른 수신전력의 감쇠를 고려한 것으로, 가시도



(a)



(b)



(c)

그림 1. 가시도 0.5(km), C_n^2 가 10^{-12} , 10^{-13} , 10^{-14} 및 10^{-15} 이고 (a)는 $\lambda=550$ (nm), (b)는 $\lambda=850$ (nm), (c)는 $\lambda=1,550$ (nm)일 때 수신전력. 실선 $C_n^2=10^{-12}$, 점선 $C_n^2=10^{-13}$, 데쉬 $C_n^2=10^{-14}$, 일점쇄선 $C_n^2=10^{-15}$

Fig 1. Receiving power when Visibility 0.5(km), for C_n^2 are 10^{-12} , 10^{-13} , 10^{-14} and 10^{-15} . The receiving power (a) $\lambda=550$ (nm), (b) $\lambda=850$ (nm), (c) $\lambda=1,550$ (nm). Real line $C_n^2=10^{-12}$, dot line $C_n^2=10^{-13}$, dash line $C_n^2=10^{-14}$, dash and dot line $C_n^2=10^{-15}$

가 6[km]에서는 가시도 0.5[km]보다는 수신전력의 감쇠가 작고, 파장에 따른 수신전력의 감쇠는 파장이 길수록 감쇠가 작아짐을 볼 수 있다.

라세그라인 광학계를 사용한 광무선통신 시스템에서 550(nm), 850(nm) 및 1550(nm)의 광 파장에 대한 인계 및 포인팅 에러의 영향에 대한 해석

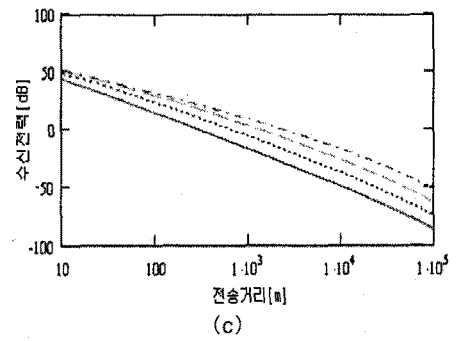
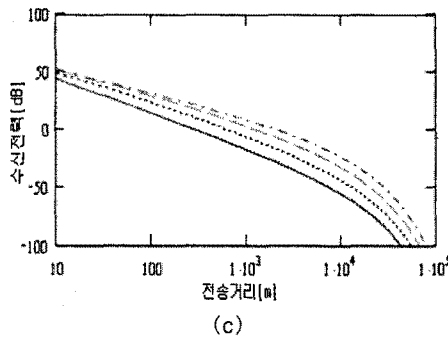
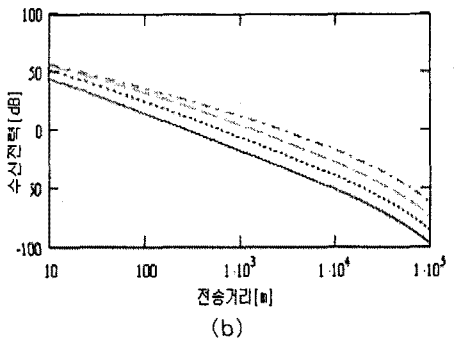
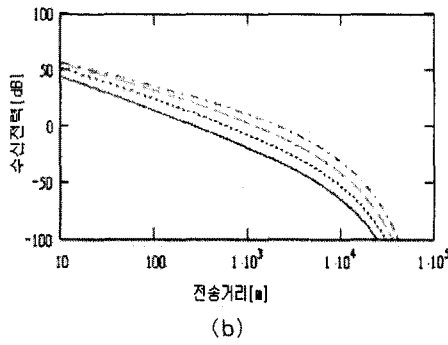
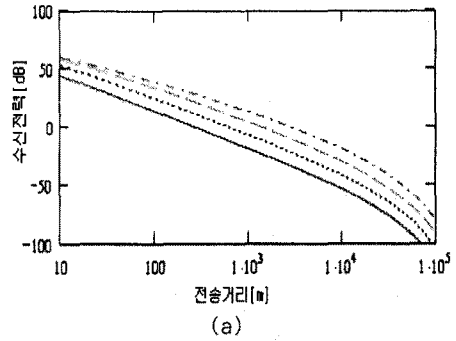
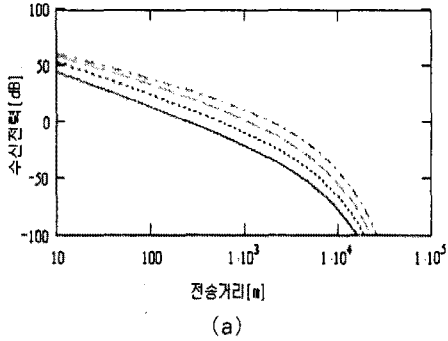


그림 2. 가시도 6(km), Cn²가 10⁻¹², 10⁻¹³, 10⁻¹⁴ 및 10⁻¹⁵이고 (a)는 λ=550(nm), (b)는 λ=850(nm), (c)는 λ=1,550(nm)일 때 수신전력. 실선 Cn²=10⁻¹², 점선 Cn²=10⁻¹³, 데쉬 Cn²=10⁻¹⁴, 일점쇄선 Cn²=10⁻¹⁵

Fig 2. Receiving power when Visibility 6[km], for Cn² are 10⁻¹², 10⁻¹³, 10⁻¹⁴ and 10⁻¹⁵. The receiving power (a) λ=550(nm), (b) λ=850(nm), (c) λ=1,550(nm). Real line Cn²=10⁻¹², dot line Cn²=10⁻¹³, dash line Cn²=10⁻¹⁴, dash and dot line Cn²=10⁻¹⁵

그림 3. 가시도 50(km), Cn²가 10⁻¹², 10⁻¹³, 10⁻¹⁴ 및 10⁻¹⁵이고 (a)는 λ=550(nm), (b)는 λ=850(nm), (c)는 λ=1,550(nm)일 때 수신전력. 실선 Cn²=10⁻¹², 점선 Cn²=10⁻¹³, 데쉬 Cn²=10⁻¹⁴, 일점쇄선 Cn²=10⁻¹⁵

Fig 3. Receiving power when Visibility 50[km], for Cn² are 10⁻¹², 10⁻¹³, 10⁻¹⁴ and 10⁻¹⁵. The receiving power (a) λ=550(nm), (b) λ=850(nm), (c) λ=1,550(nm). Real line Cn²=10⁻¹², dot line Cn²=10⁻¹³, dash line Cn²=10⁻¹⁴, dash and dot line Cn²=10⁻¹⁵

그림 3은 가시도 50[km]인 경우의 수신전력으로, Cn²가 10⁻¹², 10⁻¹³, 10⁻¹⁴ 및 10⁻¹⁵이고 (a)는 λ=550[nm], (b)는 λ=850[nm], (c)는 λ=1,550[nm]일

때이다.

그림 3에서도 수직축은 수신전력의 dB값으로 식 (15)에서 포인팅 에러에 의한 전력의 손실 및 가시도

에 따른 수신전력의 감쇠를 고려한 것으로, 가시도 50[km]에서는 가시도 0.5[km] 및 6[km]보다는 수신전력의 감쇠가 더 작고, 파장에 따른 수신전력의 감

쇠는 파장이 길수록 감쇠가 작아짐을 볼 수 있다.

식 (18)에서 식 (22)까지의 잡음 전력과 식 (7), 식 (12) 및 식 (22)을 고려한 수신 전력으로부터 대기의

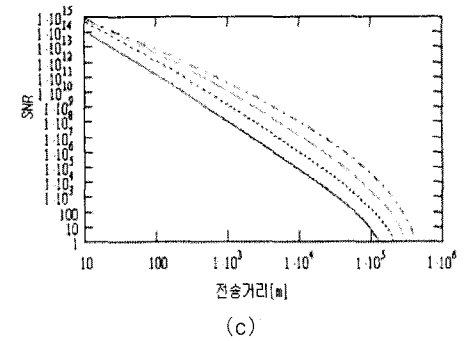
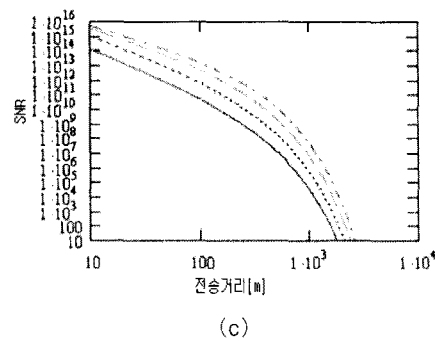
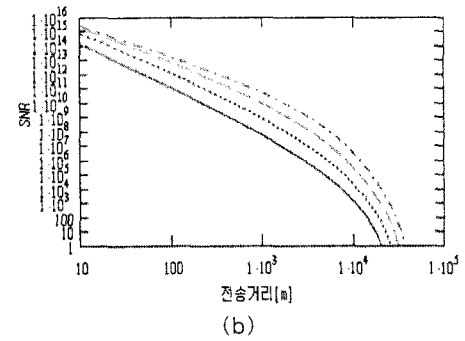
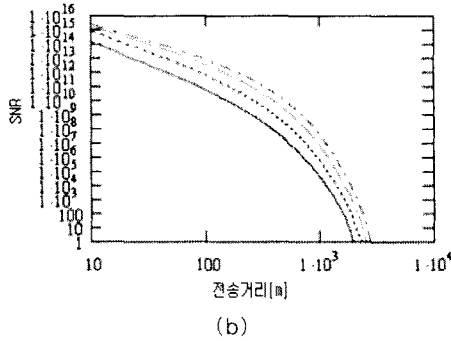
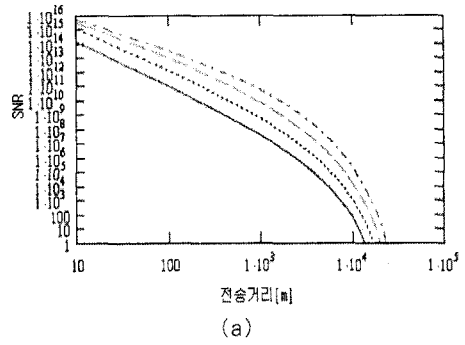
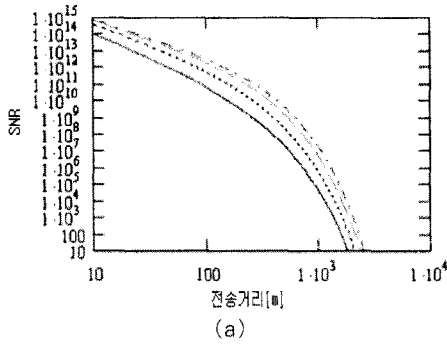


그림 4. 가시도 0.5(km), C_n^2 가 10^{-12} , 10^{-13} , 10^{-14} 및 10^{-15} 이고 (a)는 $\lambda=550$ (nm), (b)는 $\lambda=850$ (nm), (c)는 $\lambda=1,550$ (nm)일 때의 SNR. 실선 $C_n^2=10^{-12}$, 점선 $C_n^2=10^{-13}$, 데쉬 $C_n^2=10^{-14}$, 일점쇄선 $C_n^2=10^{-15}$

Fig 4. SNR when Visibility 0.5(km), for C_n^2 are 10^{-12} , 10^{-13} , 10^{-14} and 10^{-15} . The SNR (a) $\lambda=550$ (nm), (b) $\lambda=850$ (nm), (c) $\lambda=1,550$ (nm). Real line $C_n^2=10^{-12}$, dot line $C_n^2=10^{-13}$, dash line $C_n^2=10^{-14}$, dash and dot line $C_n^2=10^{-15}$

그림 5. 가시도 6(km), C_n^2 가 10^{-12} , 10^{-13} , 10^{-14} 및 10^{-15} 이고 (a)는 $\lambda=550$ (nm), (b)는 $\lambda=850$ (nm), (c)는 $\lambda=1,550$ (nm)일 때의 SNR. 실선 $C_n^2=10^{-12}$, 점선 $C_n^2=10^{-13}$, 데쉬 $C_n^2=10^{-14}$, 일점쇄선 $C_n^2=10^{-15}$

Fig 5. SNR when Visibility 6(km), for C_n^2 are 10^{-12} , 10^{-13} , 10^{-14} and 10^{-15} . The SNR (a) $\lambda=550$ (nm), (b) $\lambda=850$ (nm), (c) $\lambda=1,550$ (nm). Real line $C_n^2=10^{-12}$, dot line $C_n^2=10^{-13}$, dash line $C_n^2=10^{-14}$, dash and dot line $C_n^2=10^{-15}$

각색그레인 광학계를 사용한 광무선통신 시스템에서 550[nm], 850[nm] 및 1550[nm]의 광 파장에 대한 안개 및 포인팅 에러의 영향에 대한 해석

가시도, 광신호의 파장 및 포인팅에러를 고려한 거리에 따른 SNR은 다음과 그림과 같다. 그림 4는 가시도가 0.5[km], C_n^2 가 10^{-12} , 10^{-13} , 10^{-14} 및 10^{-15} 이고 (a)는 $\lambda=550$ [nm], (b)는 $\lambda=850$ [nm], (c)는 $\lambda=1,550$ [nm]일 때의 SNR이다.

그림 4에서는 각 파장별로 대기의 상태에서 교란의 세기가 강할수록 동일한 전송거리에서 SNR이 작음을 알 수 있다. 또한 전송광의 파장이 길어도 동일한 전송거리에 대해 SNR이 거의 같음을 알 수 있다.

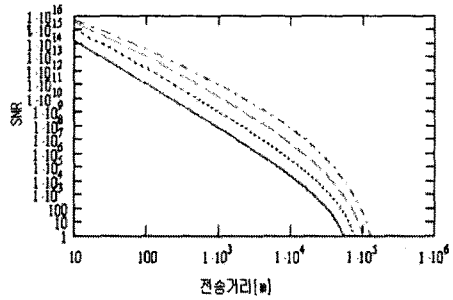
그림 5는 가시도가 6[km], C_n^2 가 10^{-12} , 10^{-13} , 10^{-14} 및 10^{-15} 이고 (a)는 $\lambda=550$ [nm], (b)는 $\lambda=850$ [nm], (c)는 $\lambda=1,550$ [nm]일 때의 SNR이다.

그림 5에서는 각 파장별로 대기의 상태에서 교란의 세기가 강할수록 동일한 전송거리에서 SNR이 작음을 알 수 있다. 또한 전송광의 파장이 길수록 동일한 전송거리에 대해 SNR이 큰 것을 알 수 있다. 가시도가 6[km]일 때가 가시도가 0.5[km]일 때보다 동일한 전송거리에 대해 SNR이 높음을 알 수 있다.

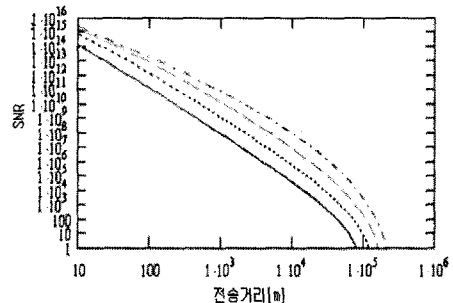
그림 6는 가시도가 50[km], C_n^2 가 10^{-12} , 10^{-13} , 10^{-14} 및 10^{-15} 이고 (a)는 $\lambda=550$ [nm], (b)는 $\lambda=850$ [nm], (c)는 $\lambda=1,550$ [nm]일 때의 SNR이다.

그림 6에서도 각 파장별로 대기의 상태에서 교란의 세기가 강할수록 동일한 전송거리에서 SNR이 작음을 알 수 있다. 또한 전송광의 파장이 길수록 동일한 전송거리에 대해 SNR이 큰 것을 알 수 있다. 가시도가 50[km]일 때의 SNR이 가시도가 6[km] 및 0.5[km]일 때보다 동일한 전송거리에 대해 SNR이 높음을 알 수 있다. 그림 7은 송신광의 파장이 550[nm]인 경우 가시도가 0.5[km], 6[km] 및 50[km]에 대한 BER이다.

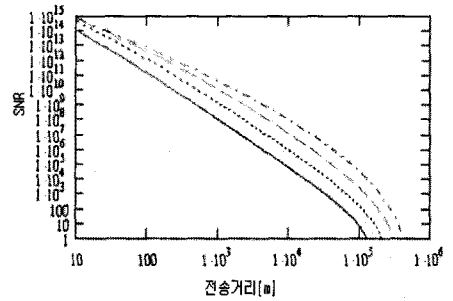
데이터 전송 시 요구되는 최소 BER을 10^{-9} 이라 하면 그림 7에서 가시도가 0.5[km]인 그림 7-a에서 보면 굴절률 구조상수가 $C_n^2 = 10^{-12}$ 인 경우는 1.5[km]까지 통신이 가능하며, $C_n^2 = 10^{-13}$ 인 경우는 1.8[km], $C_n^2 = 10^{-14}$ 인 경우는 2.2[km], $C_n^2 = 10^{-15}$ 인 경우는 2.4[km]까지 가능함을 보여 준다. 그림 7에서 가시도가 6[km]인 그림 7-b에서 보면 굴절률 구조상수가 $C_n^2 = 10^{-12}$ 인 경우는 10[km]까지 통신이 가능하며, $C_n^2 = 10^{-13}$ 인 경우는 13[km], $C_n^2 = 10^{-14}$ 인



(a)



(b)

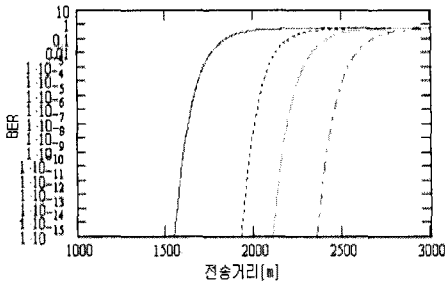


(c)

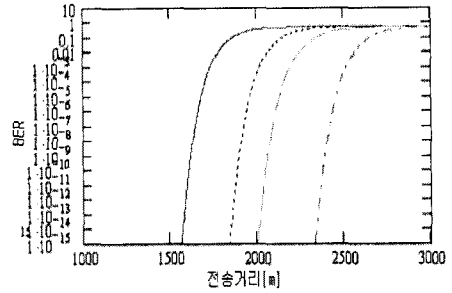
그림 6. 가시도 50(km), C_n^2 가 10^{-12} , 10^{-13} , 10^{-14} 및 10^{-15} 이고 (a)는 $\lambda=550$ (nm), (b)는 $\lambda=850$ (nm), (c)는 $\lambda=1,550$ (nm)일 때의 SNR. 실선 $C_n^2=10^{-12}$, 점선 $C_n^2=10^{-13}$, 대쉬 $C_n^2=10^{-14}$, 일점쇄선 $C_n^2=10^{-15}$

Fig 6. SNR when Visibility 50(km), for C_n^2 are 10^{-12} , 10^{-13} , 10^{-14} and 10^{-15} . The SNR (a) $\lambda=550$ (nm), (b) $\lambda=850$ (nm), (c) $\lambda=1,550$ (nm). Real line $C_n^2=10^{-12}$, dot line $C_n^2=10^{-13}$, dash line $C_n^2=10^{-14}$, dash and dot line $C_n^2=10^{-15}$

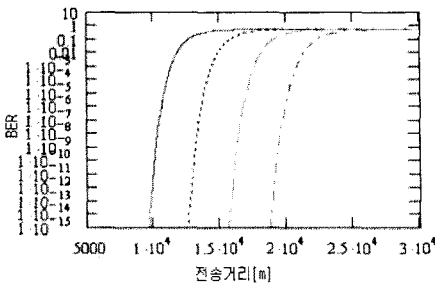
경우는 16[km], $C_n^2 = 10^{-15}$ 인 경우는 19[km]까지 가능함을 보여 준다. 그림 7에서 가시도가 50[km]인



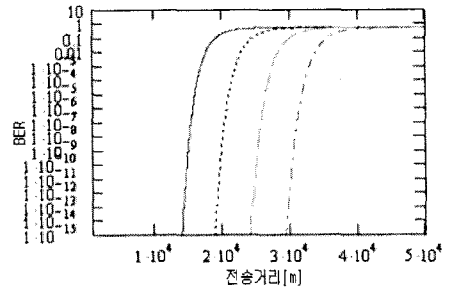
(a)



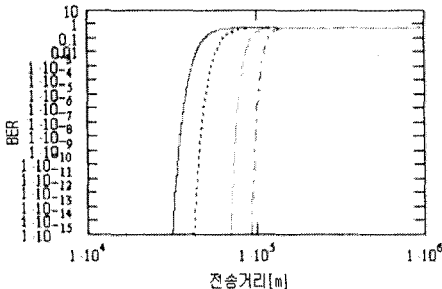
(a)



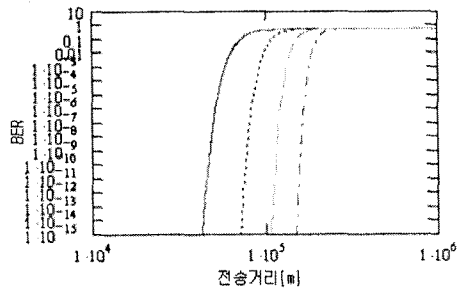
(b)



(b)



(c)



(c)

그림 7. 송신 광 파장 550(nm)인 경우 가시도 0.5(km), 6(km) 및 50(km)에 대한 BER. 실선 $C_n^2=10^{-12}$, 점선 $C_n^2=10^{-13}$, 대쉬 $C_n^2=10^{-14}$, 일점쇄선 $C_n^2=10^{-15}$

Fig 7. BER when transmission light wavelength is 550(nm) for visibilities are 0.5(km), 6(km) and 50(km). Each graph real line $C_n^2=10^{-12}$, dot line $C_n^2=10^{-13}$, dash line $C_n^2=10^{-14}$, dash and dot line $C_n^2=10^{-15}$

그림 8. 송신 광 파장 850(nm)인 경우 가시도 0.5(km), 6(km) 및 50(km)에 대한 BER. 실선 $C_n^2=10^{-12}$, 점선 $C_n^2=10^{-13}$, 대쉬 $C_n^2=10^{-14}$, 일점쇄선 $C_n^2=10^{-15}$

Fig 8. BER when transmission light wavelength is 850(nm) for visibilities are 0.5(km), 6(km) and 50(km). Each graph real line $C_n^2=10^{-12}$, dot line $C_n^2=10^{-13}$, dash line $C_n^2=10^{-14}$, dash and dot line $C_n^2=10^{-15}$

그림 7 (c)에서 보면 굴절률 구조상수가 $C_n = 10^{-12}$ 인 경우는 50[km]까지 통신이 가능하며, $C_n = 10^{-13}$ 인 경우는 60[km], $C_n = 10^{-14}$ 인 경우는 70[km], $C_n = 10^{-15}$ 인 경우는 90[km]까지 가능함을 보여 준다.

그림 8은 송신광의 파장이 850[nm]인 경우 가시도

가 0.5[km], 6[km] 및 50[km]에 대한 BER이다.

데이터 전송 시 요구되는 최소 BER을 10^{-9} 이라 하면 그림 8에서 가시도가 0.5[km]인 그림 8 (a)에서 보면 굴절률 구조상수가 $C_n = 10^{-12}$ 인 경우는

1.7[km]까지 통신이 가능하며, $C_n = 10^{-13}$ 인 경우는 1.9[km], $C_n = 10^{-14}$ 인 경우는 2.2[km], $C_n = 10^{-15}$ 인 경우는 2.4[km]까지 가능함을 보여 준다. 그림 8에서 가시도가 6[km]인 그림 8 (b)에서 보면 굴절률 구조상수가 $C_n = 10^{-12}$ 인 경우는 15[km]까지 통신이 가능하며, $C_n = 10^{-13}$ 인 경우는 20[km], $C_n = 10^{-14}$ 인 경우는 25[km], $C_n = 10^{-15}$ 인 경우는 50[km]까지 가능함을 보여 준다. 그림 8에서 가시도가 50[km]인 그림 8 (c)에서 보면 굴절률 구조상수가 $C_n = 10^{-12}$ 인 경우는 60[km]까지 통신이 가능하며, $C_n = 10^{-13}$ 인 경우는 80[km], $C_n = 10^{-14}$ 인 경우는 100[km], $C_n = 10^{-15}$ 인 경우는 200[km]까지 가능함을 보여 준다.

그림 9는 송신광의 파장이 1,550[nm]인 경우 가시도가 0.5[km], 6[km] 및 50[km]에 대한 BER이다.

데이터 전송 시 요구되는 최소 BER을 10^{-9} 이라 하면 그림 9에서 가시도가 0.5[km]인 그림 9 (a)에서 보면 굴절률 구조상수가 $C_n = 10^{-12}$ 인 경우는 1.7[km]까지 통신이 가능하며, $C_n = 10^{-13}$ 인 경우는 1.9[km], $C_n = 10^{-14}$ 인 경우는 2.2[km], $C_n = 10^{-15}$ 인 경우는 2.4[km]까지 가능함을 보여 준다.

그림 9에서 가시도가 6[km]인 그림 9 (b)에서 보면 굴절률 구조상수가 $C_n = 10^{-12}$ 인 경우는 25[km]까지 통신이 가능하며, $C_n = 10^{-13}$ 인 경우는 30[km], $C_n = 10^{-14}$ 인 경우는 45[km], $C_n = 10^{-15}$ 인 경우는 55[km]까지 가능함을 보여 준다. 그림 9에서 가시도가 50[km]인 그림 9 (c)에서 보면 굴절률 구조상수가 $C_n = 10^{-12}$ 인 경우는 80[km]까지 통신이 가능하며, $C_n = 10^{-13}$ 인 경우는 100[km], $C_n = 10^{-14}$ 인 경우는 200[km], $C_n = 10^{-15}$ 인 경우는 400[km]까지 가능함을 보여 준다.

5. 결론

대기의 교란의 강도 및 대기 중의 안개에 의한 광무선통신의 성능에 미치는 영향을 수치해석을 통해 계산해 보았다. 기존의 광무선 통신 시 카세그레인 광학계의 안테나의 이득 계산을 간략화한 식[5]을 이용하여 해석하였으나 본 논문에서는 정확한 해석

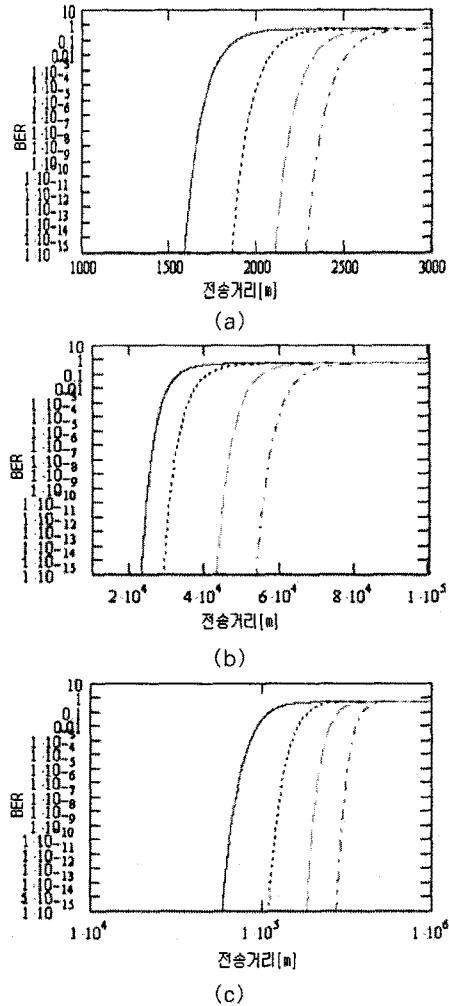


그림 9. 송신 광 파장 1,550(nm)인 경우 가시도 0.5(km), 6(km) 및 50(km)에 대한 BER. 실선 $C_n^2=10^{-12}$, 점선 $C_n^2=10^{-13}$, 데쉬 $C_n^2=10^{-14}$, 일점쇄선 $C_n^2=10^{-15}$

Fig 9. BER when transmission light wavelength is 1,550(nm) for visibilities are 0.5(km), 6(km) and 50(km). Each graph real line $C_n^2=10^{-12}$, dot line $C_n^2=10^{-13}$, dash line $C_n^2=10^{-14}$, dash and dot line $C_n^2=10^{-15}$

방법[4]을 도입하였으며, 또한, 가시도가 500m 미만 이 경우에 기존에는 식 (12)의 마지막 항의 q 를 $0.585 V^{1/3}$ 으로 하였으나 새로운 이론[10]에 따라 0으로 하였고, visibility에 따른 감쇠 항을 좀더 세분하여 결과를 도출하였다. 이를 통해 기존의 수신전력,

SNR 및 BER에 대한 좀더 정확한 값을 도출하였다. 이를 위해 사용한 송신광의 파장은 가시광선 대의 550[nm], 적외선 영역의 850[nm], 그리고 1,550[nm]의 5[mW]의 출력을 갖는다. 먼저 가시도 0.5[km]의 경우를 보면 일바넷인 광통신 교재 해석에서는 식 (12)의 승수 "q" 송신파장의 함수로 주어졌으나 참고문헌[13]의 실험에 따라 이 범위의 가시도에서는 "0"으로 정의된다. 이결과 가시도 0.5[km]의 범위에서 광 수신전력은 송신파장에 관계없이 거의 같은 값을 갖는다. 이 경우에도 교란강도의 차이에 의한 포인팅 에러의 항은 영향을 주고 있음을 볼 수 있다.

신호의 SNR 및 BER도 송신광의 파장에 관계없이 굴절률 구조상수에 따라 같은 값을 보여준다.

가시도 6[km] 및 50[km]의 경우를 보면 송신광의 파장에 따라 광 수신전력, SNR 및 BER이 송신광의 파장이 적외선 영역에서 향상됨을 볼 수 있고, 파장이 긴 1,550[nm]에서는 $BER = 10^{-9}$ 을 유지할 수 있는 거리가 가시도가 50[km], $C_n^2 = 10^{-15}$ 인 경우 약 100[km]까지 가능함을 볼 수 있다.

가시도가 6[km] 및 50[km]인 경우에는 가시도에 따른 광 감쇠 계수가 수신광의 전력에 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 그러나 가시도 0.5[km]보다 광 수신전력, SNR, BER 이 모든 파장에 대해 증가했음을 볼 수 있다. 같은 파장의 광 신호에서는 교란강도의 세기가 감소함에 따라 광 수신전력, SNR 및 BER 이 증가함을 볼 수 있다.

위의 계산 결과로 광 섬유를 이용한 통신 시스템의 최종단인 분배기에서 각 수요처로 데이터를 분배하는데 발생하고 있는 병목현상을 무선 광 통신 시스템을 도입하면 해결할 수 있고, 또한 건물과 건물 사이의 대용량의 backbone을 새로이 광 섬유로 포설하기 어려운 경우에도 이용될 수 있음을 볼 수 있다.

본 논문은 2008년 김포대 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

References

[1] William K. Pratt, "Laser communication Systems," John wiley & son, 1969.
 [2] Gray Waldman John Wootton "Electro-Optical System

Performance Modeling," Artech House Boston London, 1993.
 [3] John Gowar, "Optical communication Systems," Prentice Hall, 1984.
 [4] S. Amon, "Optical wireless communication," in Encyclopedia of Optical engineering , R. G. Driggers, 2003.
 [5] 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.
 [6] ShLomi Arnon, "Optimization of Urban Optical Wireless Communication Systems," IEEE transactions on wireless communications, Vol. 2, No. 4/ pp. 626 - 629, 4 July 2003.
 [7] Klein, B.J. Degnan, "Optical antenna gain: 1. Transmitting Antennas," Applied Optics, Vol. 13, No. 9/ pp. 134-2141, 20 1974.
 [8] Klein, B.J. Degnan, "Optical antenna gain: 2. Receiving Antennas," Applied Optics, Vol. 13, No. 9/ pp. 2397 - 2401, 20 1974.
 [9] Olga Korotkova, Larry C. Andrews, etc "OModel for a partially coherent Gaussian beam in atmospheric turbulence with application in Lasercom," Optical Engineering, Vol. 43 No. 2/ pp. 330 - 341, February 2004.
 [10] Isaac J. Kim, Bruce McArthur, etc "Comparison of Laser beam propagation at 785(nm) and 1,550(nm) in fog and haze for optical wireless communications", Optical Access Incorporated 10343 Roselle Street San Diego, CA 92121.
 [11] DeBie Kedar and ShLomi Amon, "Optical wireless communication through fog in the presence of pointing error," Applied Optics, Vol. 42, No. 24/ pp. 4946 - 4954, 20 August 2003.
 [12] 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.
 [13] Urachada Ketprom and Akira Ishimaru etc, "Channel modeling for optical wireless communication through dense fog," Journal of optical networking, Vol. 4, No. 6/ pp. 291 - 299, June 2005.
 [14] DeBie Kedar and ShLomi Arnon, "Non-line-of-sight optical wireless sensor network operating in multiscattering channel," Applied Optics, Vol. 45, No. 33/ pp. 8454 - 8461, 20 November 2006.
 [15] William K. Pratt, "Laser communication Systems," John wiley & son, 1969.

◆ 저자소개 ◆

홍권의 (洪權義)

1982년 건국대학교 공과대학교 졸업. 1984년 건국대학교 대학원 졸업(석사). 1997년 건국대학교 대학원 졸업(박사). 1984~1991년 대우중공업 중앙연구소 연구원. 1991~1997년 종로산업학교. 1997년~현재 김포대학교 정보통신과 부교수.