

대기교란이 지구국과 성층권 위성간 광 위성통신시스템에 미치는 영향에 관한 연구

Effects of Atmospheric Turbulence on the Optical Satcom Link between Stratospheric Sky Station and Earth Station

鄭 鎭 鎬*
(Jin-Ho Jung)

요 약

오늘날 통신은 인터넷 사용의 증가, 멀티미디어 서비스의 요구등으로 인해 점차 다량의 정보를 정확하고 신속하게 전송하기 위한 고속의 데이터 전송시스템이 요구되고 있으며, 머지않아 지구상공 20km 지점의 성층권에 플랫폼이라 불리는 위성을 띄워 고속의 정보 서비스가 가능할 것이다. 이 시스템은 레이저 광을 사용함으로써 높은 데이터 전송율을 갖는 광무선통신망을 구축할 수 있으나, 대기공간을 전송채널로 사용하기 때문에 대기효과로 인한 극복해야할 많은 문제점을 갖고 있다. 따라서, 본 논문에서는 교란대기하에서 교란대기효과에 따른 데이터 전송율과 비트오류율을 제시함으로써 교란대기효과가 광 위성통신시스템에 미치는 영향을 고찰하고자 한다.

Abstract

Today's communication needs the super high-speed data transmission system to send many data rapidly, correctly, and simultaneously because of the increase of Internet use, the demand of multimedia service and so on. Before long, the super high data service will be offered us by a satellite called platform which will be located at stratosphere of 20[km] over earth. It is possible to build the optical wireless communication networks which have the high data-carrying capacity because this system use a laser. But, there are many problems to overcome because it make use of the atmospheric space as transmission channel. In this paper, therefore, we study up on the relations of data rates, bit error rates, and turbulent effects of atmosphere to present the effects of atmospheric turbulence on the optical satcom link. Keyword : stratospheric sky station, satellite, optical communication, and atmospheric turbulence

*湖西大學校 電氣電子制御工學部

(Dept. of Electrical, Electronics, and Control and Instrumental Eng., Hoseo Univ.)

※본 논문은 '97년도 하반기 호서대학교 교내 연구비에 의하여 연구되었음.

接受日:1997年7月10日, 修正完了日:1997年9月30日

I. 서 론

다가 올 21세기에는 정보통신과 항공우주산업이 주축을 이루는 시대가 될 것이며, 지상과 우주공간에서 레이저를 이용한 광통신시스템이 21세기의 중요한 통신매체로 부각될 것이다. 이미 지상에서는 광섬유를 이용하여

음성뿐만 아니라 동화상을 보내기 위한 초고속 광통신망의 구축이 진행중에 있다. 그러나, 이러한 유선 광통신망은 설치 및 유지에 막대한 자본과 시간이 소요되며 지진 등과 같은 천재지변에 의해 파괴될 경우 보수에 많은 시간이 소요되는 문제점을 안고 있다. 이에 비해 무선 광통신은 설치 및 유지, 보수가 간편하고 저렴하며, 현재까지는 별도의 사용면허가 필요하지 않기 때문에 유선 광통신망의 보조 시스템이나 사설 LAN망 등에 적합하다^[1].

현재 통신위성을 이용한 위성통신시스템은 지구국-정지궤도위성, 정지궤도위성간, 지구국-저궤도위성간 통신이 있으며, 오늘날의 인공위성은 일반적으로 지상에서 37,000km 상공에 위치한 정지궤도 위성과 1,000km 상공에 위치한 저궤도 위성으로 나눌 수 있다. 이중 지상-위성간 통신시스템의 구현은 전송채널로 사용하는 대기효과로 인해 극복해야 할 많은 문제점들을 갖고 있다^[2]. 현재 정지궤도는 거의 포화상태에 이르렀으며, 이들 또한 이미 선진국에서 선점하고 있는 실정이며 위성 발사 및 그 유지 관리에 엄청난 비용이 소요되고 있다. 그러나, 미국 UCLA대학 엘프리트 왕 박사가 최근 10여년간 연구 끝에 성층권에 정지궤도를 유지하기 위해 지구상공의 한 지점에 떠있을 수 있는 새로운 추진체인 코로나 이온엔진이라는 특수기술을 개발함으로써 지구국-성층권 위성간에 대한 광통신분야는 앞으로 많은 연구가 필요한 분야라 할 수 있으며, 이를 구현하기 위해서는 먼저 대기효과가 광 위성통신시스템에 미치는 영향을 분석해야만 대기효과를 극복할 수 있는 시스템 구현이 가능할 것이다.

따라서, 본 논문에서는 지구국-성층권 위성간의 광 무선통신시스템의 구현을 위해 반드시 필요한 교란대기효과가 광 위성통신시스템에 미치는 영향에 대해 고찰하였다.

II. 대기교란 상태하에서의 성층권 위성통신 링크

광통신에 영향을 미치는 대기현상은 크게 흡수, 교란, 산란 세가지로 분류되며 맑은 날씨의 광 무선통신은 주로 흡수, 교란에 의해 지배되고, 흐린 날씨에서는 흡수, 산란에 의해 지배된다^[3]. 따라서, 본 논문에서는 교란대기 효과가 성층권 광 위성통신시스템에 미치는 효과를 고찰하고자 하며, 이때 지구국-성층권 광 위성통신시스템은 그림 1과 같다.

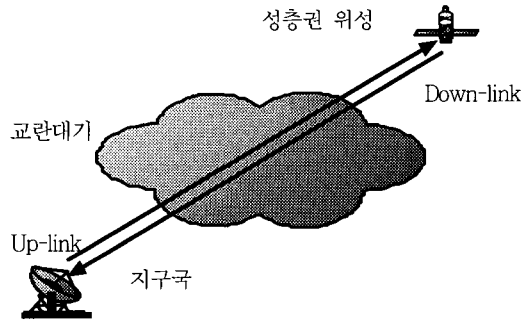


그림 1. 광위성 통신링크

Fig. 1. Optical satellite communication link.

II-1. 교란대기

대기 광 채널은 광신호가 전송될 때 흡수, 교란, 산란 등 다양한 대기효과를 나타내게 하는 기체들의 혼합물로 구성되며, 대기를 통한 광통신은 압력, 온도, 흡수를 일으키는 기체의 농도 등 대기채널의 상태에 따라 많은 영향을 받는다. 실제로 대기는 날씨상태와 대기조건에 따라 하루 동안에도 매 시간마다 계속해서 변하는 동적채널(dynamic channel)이기 때문에 대기채널을 해석하기란 매우 복잡하고 어려운 일이다. 하지만 이처럼 복잡하고 동적인 대기채널을 분석하는 것은 무선 광통신에 있어 필수불가결한 매우 중요한 일이라 할 수 있다.

교란대기는 1~2 [C]정도의 작은 온도 변화에 의하여 공기의 굴절률이 연속적으로 불규칙하게 변화되는 상태로서 주로 태양에 의한 대기 가열, 바람과 대류 현상에 의한 공기의 와류에 의해 발생된다. 그러므로, 교란대기란 대기의 굴절률이 위치와 시간의 함수인 비균질 대기이다. 광신호가 이와 같은 교란대기를 통해 전파될 때, 광신호의 진폭과 위상이 불규칙하게 변동됨으로써 무선 광통신시스템의 성능을 저하시키는 요인이 된다^[4-5]. 교란에 의해서 발생하는 현상으로는 빔편향(beam tilt), 이미지 표동(image dancing), 빔 퍼짐(beam spreading), 신틸레이션(scintillation), 공간 가간섭 요동(spatial coherence fluctuation) 등이 있다.

교란이 주요인이 되는 기상 대기 조건하에서 대기 굴절률은 온도 및 압력, 바람 등과 같이 공기의 밀도의 변화에 의해 공기의 굴절률이 불규칙하게 변화되어 레이저

빔의 전파에 영향을 미치는 것을 광학적 교란(optical turbulence)이라 한다. 이러한 광학적 교란상태에서 레이저 빔의 번쩍임이 발생하는 비흡수 매질에서의 공기 굴절을 변화는 공기밀도에 비례한다. 즉, 공기의 밀도가 증가할수록 굴절율이 커지며 공기밀도가 감소하면 굴절율은 작아진다. 공기밀도는 온도와 압력에 의존하며 시·공간적으로 변하게 된다. 이상과 같이 대기의 상태가 변함에 따라 대기의 굴절율이 불규칙하게 변하므로 전파되는 레이저 빔에 영향을 미치게 된다^[6].

이러한 교란은 다음 식과 같이 공간 위상 가산섭거리(r_o)에 영향을 미쳐 무선 광통신시스템의 성능에 영향을 미치게 된다^[7].

$$r_o = 2.1 \left[1.46 \sec(90^\circ - \phi) k^2 \int_0^L C_n^2(z) dz \right]^{-3/5} \quad (2-1)$$

여기서, 전파상수 $k = 2\pi/\lambda$ 이며, λ 는 광원의 파장, ϕ 는 양각, L 은 교란길이, $C_n^2(z)$ 는 대기 굴절을 구조함수이다. 굴절을 구조함수 $C_n^2(z)$ 은 대기교란의 세기를 나타내며, 대기의 고도 (H) 및 하루 중 시간, 계절, 지역적 대기조건에 따라 변하는 값이다. 일반적으로 $C_n^2(z)$ 값은 강한 교란상태에서는 10^{-12} [m^{-2/3}], 약한 교란상태에서는 10^{-17} [m^{-2/3}]의 범위를 갖는다^[8].

II-2. 성층권 광위성통신 링크

그림 2에서 나타난 것처럼 지구국과 성층권 위성간에 전송되는 광신호는 자유공간을 통해 실제 감쇠를 받는 대기 중에 입사되게 된다. 이때 광신호의 자유공간 손실 L_{free} 는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다^[9].

$$L_{free} = 10 \log \left\{ \frac{4\pi L}{\lambda} \right\}^2 \quad [\text{dB}] \quad (2-2)$$

여기서, L 은 성층권위성과 지구국간의 거리이다. 그림 2에서 L 은 다음 식과 같이 된다^[10].

$$L = \{ (R_E + H) \cos \theta - R_E \} \sec(90^\circ - \phi) \quad [\text{km}] \quad (2-3)$$

여기서, H 는 성층권 고도로써 약 20 [km]이고, R_E 는 지구의 반경이다. 양각 ϕ 가 10° 일 때 $\cos \theta = 0.9998$ 이므로 양각이 10° 인 지역에서는 $\cos \theta = 1$ 이므로 식 (2-3)은 다음 식과 같이 된다.

$$L = H \sec(90^\circ - \phi) \quad [\text{km}] \quad (2-4)$$

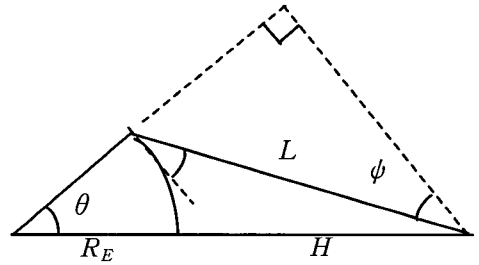


그림 2. 성층권위성과 지구국간 거리, 양각 및 고도

Fig. 2. Altitude, elevation angle, and distance between stratospheric sky station and earth station.

광신호가 지구국과 성층권 위성의 업링크와 다운링크로 송·수신될 때 신호의 빔이 수신기에 정확히 위치가 맞아야 보다 나은 통신 성능을 기대할 수 있다. 이렇게 광신호가 목표하는 위치에 정확히 수신되는 것을 빔 포인팅이 잘 되었다고 한다. 또한, 광신호의 빔이 지구국에서 성층권 위성으로 송신될 때에는 빔의 폭은 확산하게 된다. 파두에서의 분할로 인한 입사 광신호의 빔 포인팅 에러 손실 (P_E)은 다음 식으로 나타낼 수 있다^[11].

$$P_E = 10 \log \left[\frac{1}{1 + \frac{2\phi_e}{\phi_b}} \right]^2 \quad [\text{dB}] \quad (2-5)$$

여기서, ϕ_e 는 포인팅 에러이고 ϕ_b 는 광신호의 빔 폭으로 다음 식과 같이 주어진다.

$$\phi_e = \frac{\lambda}{2\sqrt{2}r_o} \quad [\text{rad}] \quad (2-6)$$

$$\phi_b = 1.27 \frac{\lambda}{d} \quad [\text{rad}] \quad (2-7)$$

여기서, d 는 안테나 직경이다.

그림 1의 성층권 광위성통신시스템의 링크 방정식은

다음 식과 같이 나타낼 수 있다^[1].

$$P_R = 10 \log(P_T) + T_T + G_T + P_E - L_{free} + G_R + G_C + T_R - M \quad [dB] \quad (2-8)$$

- 여기서, P_R : 수신 전력 [dB],
- P_T : 레이저의 출력 [W],
- G_T : 송신 안테나 이득 [dB],
- G_R : 수신 안테나의 이득 [dB],
- G_C : 부호 이득 [dB],
- M : 이득 여유 [dB],
- P_E : 대기교란에 의한 포인팅손실 [dB],
- L_{free} : 대기 흡수를 고려한 자유공간 전파손실 [dB],
- $T_T \cdot T_R$: 송·수신 시스템의 안테나 부주사 (feed) 효율 [dB] 이다.

III. 직접 광 수신방식

III-1. 광 카세그레인 안테나

일반적으로 광통신 안테나로 망원경(telescope)이 사용된다. 광통신에 사용되는 망원경의 종류에는 반사형 망원경(reflecting telescope), 뉴토키언 망원경(Newtonian telescope), 그레고리안 망원경(Gregorian telescope), 카세그레인 망원경(Cassegrainian telescope) 등이 있으나, 본 논문에서는 다른 안테나에 비해 구조가 간단하고, 무게와 전력손실이 작은 장점을 갖고 있으며 높은 지향성과 평행성(collimation)을 갖기 때문에 수신 전력이 미약한 위성통신에 매우 효율적인 광카세그레인 안테나를 성층권 위성의 송·수신 안테나 및 지구국의 송·수신용 안테나로 사용하였다^[1].

광통신 시스템에 사용되는 레이저 빔의 출력은 가우시안(Gaussian) 분포를 형성하며, 이때 광카세그레인 송신안테나 이득은 다음 식과 같이 대수적으로 표현된다^[12,13].

$$G_T = 10 \log \left[\frac{4\pi A_T}{\lambda^2} \times g_T(\alpha, \beta, \gamma, X) \right] \quad [dB] \quad (3-1)$$

여기서, $\frac{4\pi A_T}{\lambda^2}$ 는 광통신 안테나의 이득으로, λ

는 광원의 파장, A_T 는 송신 안테나의 면적이고, $g_T(\alpha, \beta, \gamma, X)$ 는 광카세그레인 송신 안테나의 전송 효율 인자이다. 가우시안 에너지 분포로 입사하는 빔에 대한 축상 (on-axis)에서의 송신 안테나 효율인자 $g_T(\alpha, \beta, \gamma, X)$ 는 인자 X 를 0으로 놓고, 원거리 장에서 β 는 0에 접근하므로 다음 식과 같이 된다^[12,13].

$$g_T = \frac{2[\exp(-\alpha^2) - \exp(-\gamma^2\alpha^2)]^2}{\alpha^2} \quad (3-2)$$

여기서, $\alpha = \frac{a}{w}$, $\gamma = \frac{b}{a}$ 이며, a 는 망원경의 1차 렌즈 반경, b 는 망원경의 2차 렌즈 반경, w 는 레이저 빔 폭이다. α 와 γ 의 관계는 2차 요동이론(second order perturbation theory)에 의해 주어진 γ 값에 대한 최적의 α 값을 구할 수 있으며 다음 식과 같다^[12,13].

$$\alpha \approx 1.12 - 1.30\gamma^2 + 2.12\gamma^4 \quad (3-3)$$

광카세그레인 수신 안테나의 이득 G_R 은 다음 식과 같이 대수적으로 표현된다^[12,13].

$$G_R = 10 \log \left[\frac{4\pi A_R}{\lambda^2} \times (1 - \gamma^2) \right] \quad [dB] \quad (3-4)$$

여기서, A_R 은 수신 안테나의 면적이다. 첫번째항 $\frac{4\pi A_R}{\lambda^2}$ 은 일반적인 초구조파이론이나 무선 광통신이론에서 이상적인 수신안테나의 이득을 나타내며, 두번째항 $(1 - \gamma^2)$ 은 카세그레인 안테나의 2차 렌즈에 의한 수신 광신호의 감소를 나타낸다.

III-2. 직접 광 수신 방식

광 수신방식에는 크게 직접 광 수신방식과 광 헤테로다인 방식이 있으나, 본 논문에서는 광 헤테로다인 수신 기와는 달리 국부발진기가 없어 입력단에서 입력신호와 국부발진신호의 파두를 일치시킬 필요가 없어 광헤테로다인 수신기에 비해 간단한 직접 광 수신방식을 사용하였다. 일반적으로 직접 광 수신방식은 광 수신소자에 의

대기교란이 지구국과 성층권 위성간 광 위성통신시스템에 미치는 영향에 관한 연구

해 광자에너지가 수신됨으로써 원래 신호를 복조하기 때문에 광자 카운터 방식이라고도 하며, 그 구조는 그림 3과 같다^[1].

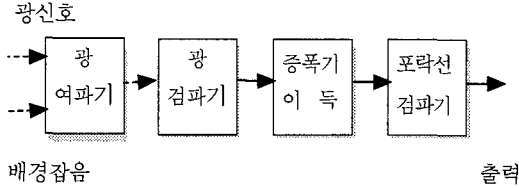


그림 3. 직접 광 수신방식.

Fig. 3. Optical direct detection system.

대기 채널을 통과한 광신호는 대기 산란과 대기 교란에 의해 랜덤하게 되며, 배경잡음과 혼합된 광신호는 광검출 소자에 입사하게 되며, 이때, 수신된 광신호는 다음 식으로 표시된다.

$$E_r(t, r) = E_s(t, r) + E_b(t, r) \quad (3-5)$$

여기서, E_s 는 정보신호에 대한 광신호, E_b 는 배경잡음에 의한 광신호, t 는 수신 시간, r 은 광 수신 소자의 한 점의 위치를 나타낸다.

대기채널을 통과한 후, 광신호는 그림 3에서 처럼 광대역 통과 필터와 공간 필터에 의해 대부분의 배경 잡음은 제거되므로 수신된 광신호의 평균전력은 다음 식과 같이 표현된다.

$$\overline{P_R} = \int_A \overline{I}(t, r) dr \quad (3-6)$$

여기서, $I(t, r) = |E_s(t, r)|^2$ 로써 수신된 광신호의 강도(intensity)이고, A 는 광검출 소자의 면적이다. 따라서, 그림 3에서 신호 광전류의 평균값은 다음 식으로 주어진다.

$$I_p = D \overline{P_R} G \quad (3-7)$$

여기서, $D = \frac{e\eta}{h\nu}$ 이며, e 는 전자의 전하량, η 는 광검출소자의 양자효율, h 는 플랑크 상수, ν 는 광원의 주파수, $\overline{P_R}$ 은 평균 수신전력, G 는 전류이득이다. 따라서, 수신기의 부하저항이 R_L 일때 평균 신호

전력은 다음 식으로 표시된다^[11].

$$S = I_p^2 R_L = (D \overline{P_R} G)^2 R_L \quad (3-8)$$

잡음전력은 산탄잡음(N_{shot})과 대기채널에 의한 신호의 분산전력항(N_{atmo})으로써 다음 식과 같이 표현된다^[12].

$$N_{shot} = 2eG^2 D \overline{P_R} B_c \quad (3-9)$$

$$N_{atmo} = G^2 D^2 var(P_R) R_L \quad (3-10)$$

여기서, B_c 는 신호의 대역폭이다.

따라서, 식 (3-8), (3-9), (3-10) 으로부터 직접 광수신 방식의 신호 대 잡음 비는 다음과 같다^[11].

$$\begin{aligned} SNR &= \frac{(D \overline{P_R} G)^2 R_L}{2eG^2 D \overline{P_R} B_c + G^2 D^2 var(P_R) R_L} \\ &= \frac{1}{\frac{2h\nu_c B_c}{\eta P_R} + \Delta P_r} \end{aligned} \quad (3-11)$$

여기서, 정규화된 신호전력의 분산 (ΔP_r)은 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta P_r &= \frac{2}{d^2} \int_0^1 \exp\left[-3.44 \left(\frac{ud}{r_0}\right)^{5/3}\right] \\ &\quad \times [\cos^{-1}u - u\sqrt{1-u^2}] u du \end{aligned} \quad (3-12)$$

ASK 변조된 신호를 포락선 복조 하였을 때 비트 오류율은 다음 식과 같다^[11].

$$BER = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{SNR}{4}\right) \quad (3-13)$$

따라서, 시스템의 데이터 전송율은 식 (3-11), (3-12), (3-13)에 의해 다음 식으로 구해진다.

$$R_b = \frac{\eta P_R}{2h\nu_c} \left(\frac{1}{-4 \ln(2 BER)} - \Delta P_r \right) \quad (3-14)$$

IV. 컴퓨터 시뮬레이션 및 결과 고찰

본 논문에서는 광원으로 파장이 1.55[μ m], 송신전력이 10[mW]인 InGaAsP 반도체 레이저를 사용하였고, 송·수신용 안테나로 사용된 광 카세그레인 안테나의 직경은

1[m], 차단비율(γ)은 0.26, 부주사효율(T_T, T_R)은 각각 -3[db], 양자효율(η)은 0.9이고, 시스템의 부호화 이득(G_c)은 5[db], 시스템 마진(M)은 3[db], 비트오류율(BER)은 10^{-9} 으로 설정하여 교란대기가 성층권 위성과 지구국간의 광 위성통신시스템에 미치는 영향을 분석하였다.

IV-1. 대기교란 상태에 따른 데이터 전송율

그림 4는 여러가지 양각에서 수신시스템 비트오류율 10^{-9} 을 만족하는 대기교란상태에 따른 데이터 전송율을 로그스케일로 나타낸 것이다. 양각이 40° 이상에서는 강한 교란상태에서도 10 [Gbps]의 고속 데이터 전송이 가능하며, 30° 에서는 약 $3 \times 10^{-13} [m^{-2/3}]$, 20° 에서는 $5.5 \times 10^{-14} [m^{-2/3}]$, 10° 에서는 $2 \times 10^{-15} [m^{-2/3}]$ 이하의 약 교란상태하에서만 10[Gbps]의 고속 데이터 전송이 가능함을 알 수 있다. 따라서, 이 결과들로부터 대기의 교란상태에 따라 양각별로 전송가능한 전송율을 알 수 있다. 원하는 데이터 전송율로 데이터를 전송하기 위해서는 양각이 작을수록 대기가 약한 교란상태여야 함을 알 수 있다.

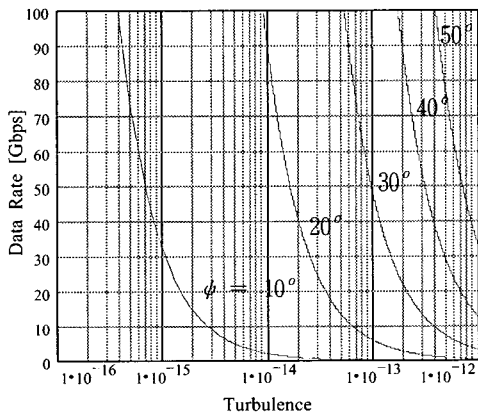
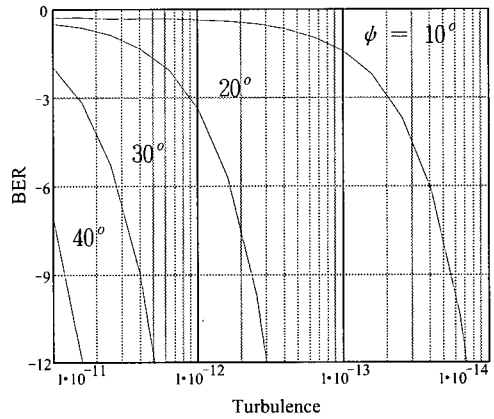


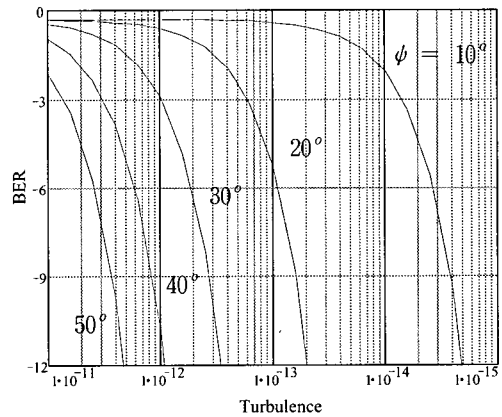
그림 4. 양각에 따른 대기교란 상태에 대한 데이터 전송율
 Fig. 4. Date rate vs. atmospheric turbulence state at the various elevation angles.

IV-2. 대기교란 상태에 따른 비트오류율

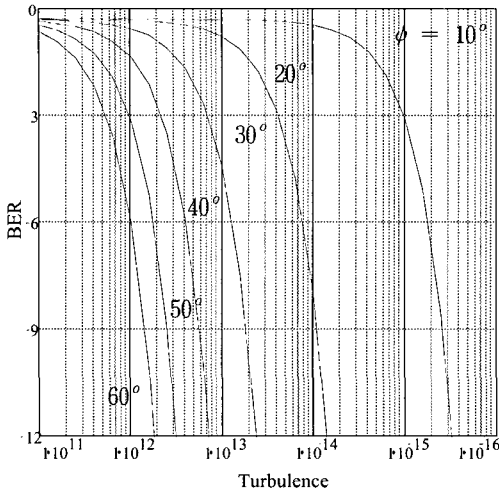
그림 5 (a), (b), (c)는 전송율이 각각 1[Gbps], 10[Gbps], 100[Gbps]일때, 교란대기 상태에 따른 수신시스템 비트오류율(BER)에 대한 특성곡선이다. 각 그림에서 보듯이 비트오류율 10^{-9} 을 만족하기 위해 동일한 전송율에서 양각이 작을수록, 동일한 양각에서 전송율이 높아질수록 대기의 교란이 약한 상태여야 함을 알 수 있다. 또한, 양각이 40° 정도만 되면 강한 교란상태에서도 전송율 10 [Gbps]의 고속 데이터 전송이 가능함을 알 수 있다.



(a) $R_b = 1$ [Gbps]



(b) $R_b = 10$ [Gbps]



(c) $R_b = 100$ (c) [Gbps]

그림 5. 전송율에 따른 대기교란 상태에 대한 비트오류율

Fig. 5. Bit error rate vs. atmospheric turbulence state at the various data rates.

V. 결 론

본 논문에서는 대기 교란상태하에서 지구국과 성층권 위성간 무선 광 위성통신시스템을 구축하기 위하여 교란 대기상태에 따른 데이터 전송율과 비트오류율을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 분석함으로써 교란 대기가 시스템에 미치는 영향을 고찰하였다.

이를 위해 본 논문에서는 성층권 위성통신시스템의 광원으로 대기흡수의 영향을 줄일 수 있도록 1.55[μ m] 파장의 10[mW] InGaAsP 반도체 레이저를 사용하였고, 안테나의 직경이 1[m]인 광카세그레인 안테나를 송·수신용 안테나로 사용하였다. 또한, 수신방식은 수신방식이 간단한 직접 광 수신방식을 채택하였으며, 변조방식은 ASK 변조방식을 사용하였다.

수치해석 결과, 양각이 40° 정도만 되면 강한 교란상태에서도 전송율 10[Gbps]의 고속 데이터 전송이 가능하며, 비트오류율 10⁻⁹을 만족하기 위해 동일한 전송율에서는 양각이 작을수록, 동일한 양각에서는 전송율이 높아질수록 대기의 교란이 약한 상태여야 함을 알 수 있

다. 또한, 이 결과로부터 대기의 교란상태에 따라 양각 별로 전송가능한 전송율을 알 수 있고, 원하는 데이터 전송율로 데이터를 전송하기 위해서는 양각이 작을수록 대기가 약한 교란상태여야 함을 알 수 있다.

따라서, 본 논문의 결과들은 교란대기하에서 성층권 위성과 지구국간의 광 위성통신시 지구국의 양각과 그 지역의 대기상태에 따른 데이터 전송율 및 수신 임계비트오류율을 해석하는데 매우 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 이러한 시스템의 구현을 위해서는 교란대기상수를 측정할 수 있는 Lidar시스템도 개발되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] Morris Katzman, Ed, *Laser Satellite Communication*, Prentice-Hall, 1987.
- [2] Stephen G. Lambert and William L. Casey, *Laser Communications in space*, Artech House, 1955.
- [3] K. A. Winick, "Atmospheric Turbulence - Induced Signal Fades on Optical Heterodyne Communication Links," *Applied Opt.*, Vol. 25, pp.1817-1825, June 1986.
- [4] J. I. Davis, "Consideration of Atmospheric Turbulence in Laser System design," *Applied Opt.*, Vol.5, No.1, January 1996.
- [5] Willaim K. Pratt, *Laser Communication Systems*, John Wiley & Sons, 1969.
- [6] V. I. Tartarski, *Wave Propagation in a Turbulent Medium*, McGraw-Hill, 1961.
- [7] Frederic G. Smith, *Atmospheric Propagation of Radiation*, SPIE Optical Eng. Press, 1993.
- [8] K. Seyrafi and S. A. Hovanessian, *Introduction to Electro-Optical Imaging and Tracking Systems*, Artech House, 1993.
- [9] John Gowar, *Optical Communication Systems*, Prentice-Hall, 1984.
- [10] G. Maral and M. Bousquet, *Satellite Communication Systems*, 2nd Ed., John Wiley & Sons, 1993.
- [11] Rober M. Grigliardi, Sherman Karp, *Optical*

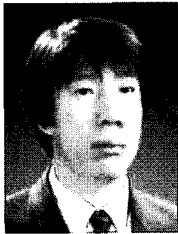
Communications, John Wiley & Sons, New York, 1995.

[12] Bernard J. Klein and John J. Degan, "Optical Antenna Gain 1 : Transmitting Antennas,"

Applied Opt., Vol. 13, No. 9, September 1974.

[13] John J. Degan and Bernard J. Klein, "Optical Antenna Gain 2 : Receiving Antennas," *Applied Opt.*, Vol. 13, No. 10, October 1974.

저 자 소 개



鄭 鎮 錡(正會員)

1989년 2월 건국대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사), 1987년 3월 - 1997년 현 호서대학교 전기전자제어공학부 부교수. 주관심분야는 광파통신, 광위성통신, 집적광학, WDM임.