

앙각변동에 따른 Ku 밴드 안테나 G/T 분석 및 실험

Ku Band Antenna G/T Analysis and Experiment According to Elevation Angle Change

이 경 순* · 구 경 현

Kyung-Soon Lee* · Kyung-Heon Koo

요 약

위성 단말기가 차량 이동하면서 통신을 유지하려면 실시간 안테나 방위각과 앙각 보정이 필요하다. 앙각 보정은 안테나에 유입되는 외부 잡음온도 변동을 수반하여 시스템 G/T에 영향을 끼친다. G/T는 안테나이득 G(Gain)와 잡음온도 T(Noise temperature)의 비율로 표현되며, 안테나 이득설계에 필요한 중요 성능지수이다. 본 논문은 앙각변동을 고려한 G/T 분석 및 안테나 설계절차 수립을 목표로 한다. 이를 위해 ITU-R P.372 Radio Noise 권고사항에 따라 강우감쇠를 포함한 휘도온도와 앙각과의 관계를 분석하였다. 다음에 분석결과를 기반으로 안테나를 제작하여 G/T 측정에 의한 설계절차를 검증하였다. 이 실험을 통해 앙각에 따른 G/T를 확인하였으며, 시스템에서 요구되는 최소 안테나 이득 분석 및 설계절차를 수립할 수 있었다.

Abstract

In order to maintain communication while the vehicle is moving, satellite azimuth angle and elevation angle correction are needed in real time. The elevation angle correction affects the system G/T according to the variation of the external noise temperature flowing into the antenna. G/T is expressed as a ratio of power gain G to noise temperature T and is an important performance function required for antenna gain design. This paper aims to G/T analysis considering elevation angle change and the establishment of an antenna design procedure. For this purpose, the relationship between elevation angle and brightness temperature including rain attenuation was analyzed according to recommendation ITU-R P.372 radio noise. Next, an antenna was designed based on the analysis results and design procedure was verified by G/T measurement. Through this experiment, G/T according to elevation angle was confirmed, and the minimum antenna gain analysis and design procedure required in the system could be established.

Key words: Antenna Gain, Noise Temperature, Elevation Angle, Rain Attenuation, Satellite System

I. 서 론

위성통신 시스템은 기지국에서 송신한 음성, 영상 및 데이터 등 신호를 위성을 이용하여 단말기로 전달한다.

단말기는 송수신용과 수신전용 또는 고정용과 차량용 등으로 구분할 수 있다. 차량용 단말기는 이동하면서 통신하기 때문에 안테나 방위각과 앙각을 위성 방향으로 실시간 정렬하여야 한다. 본 연구에서는 단말기의 위치좌표

인천대학교 전자공학과(Department of Electronics Engineering, Incheon National University)

*에이앤티테크놀로지(A&P Technology Co., Ltd.)

· Manuscript received February 27, 2017 ; Revised April 27, 2017 ; Accepted June 19, 2017. (ID No. 20170227-017)

· Corresponding Author: Kyung-Soon Lee (e-mail: telematics@naver.com)

에 따라 위성을 바라보는 양각이 약 30~90도 사이에 놓인다고 가정하였다. 양각에 따라 잡음 휘도온도의 차이가 발생하여 시스템 G/T가 변하는 것으로 알려져 있다. G/T는 위성통신 시스템 성능과 경제성의 상호 교환관계를 갖는 매우 중요한 변수이다. 따라서 시스템의 목적과 서비스에 맞는 합리적 G/T 설정을 위해서는, 양각과 휘도온도 분석에 따른 안테나 이득설계가 반드시 필요하다. 본 논문에서는 ITU-R P.372 Radio Noise 권고사항^[1]을 기반으로 양각 및 강우감쇠를 포함한 휘도온도를 분석한다. 시스템 성능에 필요한 G/T를 추가 분석하여 요구되는 안테나 이득을 추정하고, 안테나 제작 및 무반사실 측정을 통해 이론적 G/T 추정치와 측정결과를 비교한다. 양각에 따른 G/T를 실험하기 위해 제작한 안테나를 김포($\theta = 30.2^\circ$)와 싱가포르($\theta = 71.4^\circ$)에서 위성 ST-2(88°E)의 비콘신호 C/N 직접 측정 방법으로 G/T를 도출한다. 이 과정을 통해 요구되는 안테나 이득 분석 등 시스템 설계절차 모형을 수립하도록 한다.

II. 분석 및 설계

G/T는 주파수에 대한 안테나 이득 G 를 시스템 등가 잡음온도 T 로 나눈 값으로 단위는 dBK^{-1} 이다. 여기서 잡음온도는 지구 외부에서 유입되는 우주잡음, 번개의 방전과 같은 자연잡음, 엔진점화와 같은 인공잡음, 대기가스 및 강우 등에서 기인된다. 본 논문에서는 인공적인 타 송신기의 동일 채널전송, 불요 방사 및 번개 등에 의한 잡음 등은 고려하지 않는다. 시스템의 수신 잡음온도 총합 T_{SA} 는 안테나 출력을 기준으로 식 (1a)과 같이 표현된다^[2].

$$T_{SA} = T_A + T_o(a_s - 1) + a_t T_R \quad (\text{K}) \quad (1a)$$

여기서 T_A 는 안테나 잡음온도, a_s 는 안테나와 LNA 사이의 전력손실 총합, a_t 는 안테나와 LNA 사이의 전송선로에 의한 전력손실, T_R 는 LNA의 잡음온도, T_o 는 상온 잡음온도 290 K이다. 강우환경을 고려한 안테나 잡음온도 T_A 는 다음과 같이 구성된다^[3].

$$T_A = \frac{T_{SKY}}{a_r} + T_{RAIN} + T_b \quad (\text{K}) \quad (1b)$$

여기서 a_r 은 강우손실, T_{RAIN} 는 강우 잡음온도, T_{SKY} 는

대기가스 및 구름에 의한 대기환경 잡음온도 그리고 T_b 는 맑은 하늘의 휘도온도이다.

2-1 강우 잡음온도

강우감쇠는 10 GHz 이상의 전파에서 경로손실의 지배적 요소로 위성통신 전파손실경로 계산 시 크게 고려해야 하는 변수이다. 이것은 주파수, 위경도와 강수량에 따라 변하며, 연간평균 $x\%$ 에 해당하는 강우감쇠 $A_{x\%}$ 는 강우감쇠 계수 γ_R 에 실효 강우 경사 경로길이 L_E 를 곱하여 다음과 같이 구한다^[4].

$$A_{x\%} = \gamma_R L_E \quad (\text{dB}) \quad (2)$$

여기서 γ_R 는 강우감쇠계수(dB/km), L_E 는 강우고도 h_R 까지 경사 경로길이 $L_S(\text{km})$ 및 수직조정계수 $v_{x\%}$ 등으로부터 유도되며, 도식적 표현은 그림 1과 같다.

경사 경로길이는 양각 5도를 기준으로 각각 다른 식을 사용한다. 본 논문에서는 양각 30~90도 사이의 G/T 분석을 고려하므로, 양각 $\theta > 5^\circ$ 일 때의 식을 사용한 경사 경로길이 L_S 및 수평투영길이 L_G 는 다음과 같다^[4].

$$L_S = \frac{(h_R - h_S)}{\sin \theta} \quad (\text{km}) \quad (3a)$$

$$L_G = L_S \cos \theta \quad (\text{km}) \quad (3b)$$

여기서 h_S 는 안테나의 높이, h_R 는 강우고도이다. 0°C 의 평균 등온선고도 h_0 와 강우고도 h_R 는 ITU-R P.839.4에서 다

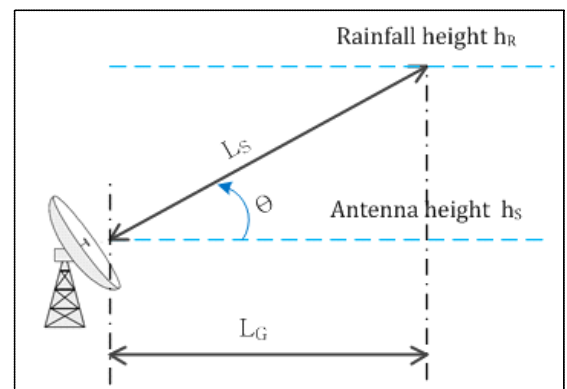


그림 1. 강우 경로의 도식적 표현

Fig. 1. Schematic representation of a rain path.

음과 같이 제시되었다^[5].

$$h_R = h_0 + 0.36 \text{ (km)} \quad (4a)$$

강우상태 평균 등온선고도 h_0 는 안테나 위도 좌표각 ζ 에 따라 다음과 같이 근사치를 구한다^[6].

$$h_0 = \begin{cases} 5 - 0.075(\zeta - 23) & \text{for } \zeta > 23 N \\ 5 & \text{for } 0 \leq \zeta \leq 23 N \\ 5 + 0.1(\zeta + 21) & \text{for } -71 \leq \zeta < -21 S \\ 0 & \text{for } \zeta < -71 S \end{cases} \quad (4b)$$

경기도 김포(위도 37.5°N) 및 싱가포르(위도 1.4°N)에 해당되는 강우고도 h_R 를 계산하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} h_R(N37.5) &= 5 - 0.075(37.5 - 23) + 0.36 \\ &= 4.26 \text{ (km)} \\ h_R(N1.4) &= 5 + 0.36 = 5.36 \text{ (km)} \end{aligned} \quad (5)$$

안테나 높이 $h_S = 0.06$ km일 때, 위성 ST-2(88°E)를 바라보는 양각인 $\theta = 30.2^\circ$ (김포) 및 $\theta = 71.4^\circ$ (싱가포르)를 각각 적용한 경사경로길이 및 수평투영길이는 표 1과 같다.

강우 감쇠계수 γ_R 및 수평 감쇠계수 $r_{x\%}$ 는 다음 식과 같다. 여기서 $R_{x\%}$ 은 해당지역 연간평균 $x\%$ 에 해당하는 연중 평균강우량 mm/h, k 와 a 는 주파수에 대한 보정상수이며 주파수 f 의 단위는 GHz이다^[4].

$$\gamma_R = k (R_{x\%})^a \quad (6a)$$

연중 평균 $p\%$ 에 해당되는 평균 강우량 $R_{(p)}$ 는 지역의 기상정보를 사용하거나 ITU-R의 자료를 선택할 수 있는데,

$$r_{x\%} = \frac{1}{1 + 0.78 \sqrt{\frac{L_G \gamma_R}{f}} - 0.38(1 - e^{-2L_G})} \quad (6b)$$

표 1. 경사경로길이 및 수평투영길이 결과(km)

Table 1. Results of slant-path length and horizontal projection(km).

City(elevation)	L_S	L_G
Gimpo $\theta = 30.2^\circ$	8.35 km	7.22 km
Singapore $\theta = 71.4^\circ$	5.59 km	1.78 km

본 논문에서는 ITU-R SM.1448의 자료를 인용하여 김포 (Zone K)와 싱가포르(Zone P)로 구분하여 각각 계산하였다^[6].

$$\begin{aligned} \text{Zone K: } R_{(p)} &= 4.17p^{-0.418} \\ &+ 1.6 \left[\log\left(\frac{p}{0.001}\right) \log^3\left(\frac{0.3}{p}\right) \right] \end{aligned} \quad (7a)$$

$$\begin{aligned} \text{Zone P: } R_{(p)} &= \\ 15.6 \left\{ p^{-0.383} + \left[\log\left(\frac{p}{0.001}\right) \log^{1.5}\left(\frac{0.3}{p}\right) \right] \right\} \end{aligned} \quad (7b)$$

Ku밴드 12 GHz 수직편파에 대하여 ITU-R P.838-3에서 제시한 보정상수 $k_V = 0.02455$, $\alpha_V = 1.1216$ 를 적용한 연간평균 0.1 %, 0.3 %에 해당하는 강우량 계산결과는 표 2와 같다. 위 계산식은 0.3 %가 한계이므로 0.5 %에 대한 추정은 강우량 그래프 기율기를 활용하여 계산하였다.

연간 평균 강우량 $x\%$ 에 해당하는 경우의 수직조정계수 $v_{x\%}$ 및 실효 강우 경사경로길이 L_E 는 다음 절차로 구한다^[4].

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{h_R - h_S}{L_G r_{x\%}} \right) \text{ (deg)} \quad (8a)$$

$$\text{for } \phi > \theta, L_R = \left(\frac{L_G r_{x\%}}{\cos \theta} \right) \text{ (km)} \quad (8b)$$

$$\text{for } \phi \leq \theta, L_R = \left(\frac{h_R - h_S}{\sin \theta} \right) \text{ (km)} \quad (8c)$$

$$|\zeta| < 36, y = 36 - |\zeta| \text{ (deg)} \quad (8d)$$

$$|\zeta| \geq 36, y = 0 \text{ (deg)} \quad (8e)$$

$$v_{x\%} = \frac{1}{1 + \sqrt{\sin \theta} \left[31(1 - e^{-(\theta/(1+x))}) \frac{\sqrt{L_R \gamma_R}}{f^2} - 0.45 \right]} \quad (8f)$$

표 2. 연중 평균강우량 계산결과(mm/h)

Table 2. Results of rainfall for average year(mm/h).

City	Rainfall 0.5 %	Rainfall 0.3 %	Rainfall 0.1 %
Gimpo	3.9 mm/h	6.8 mm/h	11.2 mm/h
Singapore	9.6 mm/h	24.7 mm/h	47.9 mm/h

실효 강우 경사경로길이 L_E 는 다음과 같다.^[4]

$$L_E = L_R v_x \% \quad (\text{km}) \quad (9)$$

ST-2(88°E) 위성을 바라보는 앙각 $\theta = 30.2^\circ$ (김포), $\theta = 71.4^\circ$ (싱가포르)와 12 GHz 수직편파에 대한 연간 평균 강우율 0.1 %, 0.3 % 및 0.5 %에 해당하는 강우감쇠 $A_{x\%}$ 계산결과는 표 3과 같다.

강우감쇠를 강우 잡음온도로 다음과 같이 변환시킨다^[9]. 여기서 T_m 은 강우 형성층의 평균 잡음온도로 주요 리포트에서 270~290 K 사이로 대다수 보고되었다^[8]. 본 논문에서는 CCIR Report 564에서 제시한 통상적인 275 K를 적용하였다.

$$T_{RAIN} = T_m \left[1 - 10^{-\left(\frac{A_x}{10}\right)} \right] \quad (\text{K}) \quad (10)$$

2-2 대기가스 및 구름 잡음온도

대기가스 및 구름 등에 의한 잡음온도 T_{SKY} 는 식 (11)과 같다. 여기서, A_g 는 대기가스 성분에 의한 경로손실, A_c 는 구름에 의한 경로손실로 단위는 dB이다^[9].

$$T_{SKY} = T_m \left[1 - 10^{-\left(\frac{A_c + A_g}{10}\right)} \right] \quad (\text{K}) \quad (11)$$

대기가스 성분에서 잡음온도에 영향을 주는 주 요소는 수증기와 산소이며, 복사전달 방정식에 의해 앙각별로 잡음온도를 계산할 수 있다. 본 논문에서 인용한 기압 1013 mb, 절대습도 7.5 g/m³, 주파수 45 GHz까지 앙각별로

표 3. 강우감쇠 계산결과(dB)

Table 3. Results of rain attenuation(dB).

City	Rainfall 0.5 %	Rainfall 0.3 %	Rainfall 0.1 %
Gimpo	1.16 dB	2.06 dB	3.34 dB
Singapore	2.20 dB	5.07 dB	8.71 dB

표 4. 강우 잡음온도 계산결과(K)

Table 4. Results of rain noise temperature(K).

City	Rainfall 0.5 %	Rainfall 0.3 %	Rainfall 0.1 %
Gimpo	64.52 K	104.15 K	147.78 K
Singapore	109.52 K	189.49 K	238.03 K

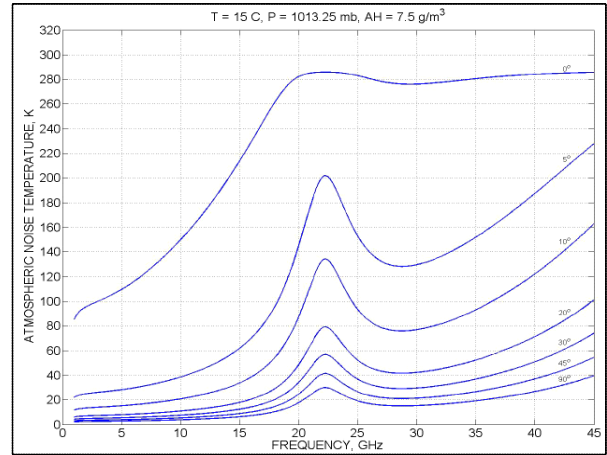


그림 2. 대기가스에 의한 잡음온도^[9]

Fig. 2. Noise temperature by atmospheric gases^[9].

계산한 대기가스 잡음온도 T_g 제시는 그림 2와 같다.

구름에 의한 감쇠 A_c 는 ITU-R P.840-5 구름 및 안개감쇠 권고에서 제시한 구름감쇠 관련 다음의 식으로 구한다. 여기서 θ 는 앙각, K_l 은 구름의 단위감쇠계수, $L(\text{kg/m}^2)$ 은 수분의 총주상함량을 말한다^[10].

$$A_c = \frac{LK_l}{\sin\theta} \quad (\text{dB}) \quad \text{for } 90^\circ \geq \theta \geq 5^\circ \quad (12)$$

수분 유전체 유전율 $\epsilon(f)$ 에 대해 double-Debye 모델을 사용하는 레일리 산란기반의 수학적 모델을 사용하여 1,000 GHz까지의 K_l 을 다음과 같이 계산할 수 있다^[10].

$$K_l = \frac{0.819f}{\epsilon''(1 + \eta^2)} \quad (\text{dB/km})/(\text{g/m}^3) \quad (13a)$$

$$\eta = \frac{2 + \epsilon'}{\epsilon''} \quad (13b)$$

수분의 복소유전율 ϵ'' , ϵ' 는 다음과 같다.

$$\epsilon''(f) = \frac{f(\epsilon_0 - \epsilon_1)}{f_p \left[1 + \left(\frac{f}{f_p} \right)^2 \right]} + \frac{f(\epsilon_1 - \epsilon_2)}{f_s \left[1 + \left(\frac{f}{f_s} \right)^2 \right]} \quad (14a)$$

$$\epsilon'(f) = \frac{(\epsilon_0 - \epsilon_1)}{\left[1 + \left(\frac{f}{f_p} \right)^2 \right]} + \frac{(\epsilon_1 - \epsilon_2)}{\left[1 + \left(\frac{f}{f_s} \right)^2 \right]} + \epsilon_2 \quad (14b)$$

여기서 $\varepsilon_0, \varepsilon_1, \varepsilon_2$ 는 다음과 같다.

$$\varepsilon_0 = 77.6 + 103.3(\theta - 1) \quad (14c)$$

$$\varepsilon_1 = 5.48, \quad \varepsilon_2 = 3.51, \quad \theta = \frac{300}{t_e} \quad (14d)$$

t_e 는 주변온도(K)이며, 기본 및 보조 완화주파수 f_p, f_s 는 다음과 같다.

$$f_p = 20.09 - 142(\theta - 1) + 294(\theta - 1)^2 \quad (15a)$$

$$f_s = 590 - 1500(\theta - 1) \quad (15b)$$

식 (13a)~식 (15b)을 사용하여 주파수 5~20 GHz의 범위와 대기온도 $-20 \sim +20^\circ\text{C}$ 사이에서 구름감쇠계수 K_l 의 계산결과는 그림 3과 같다.

대기온도 0°C 및 12 GHz의 구름감쇠계수 0.11를 적용하고, ITU-R P.840-5에서 권고한 한국 및 싱가포르지역 연중 평균 0.1 %에 해당하는 조건의 구름 수분의 총주상함량 $L = 4 \text{ kg/m}^2$ 을 대입하여 양각 5~90° 사이의 구름감쇠 A_c 를 식 (12)로 계산한 결과는 그림 4와 같다. 위의 결과는 양각이 지표면에 가까워질수록 구름감쇠의 크기가 증가한다는 것을 알 수 있다. 그림 2의 대기가스 잡음온도 T_g 를 대기가스 감쇠 A_g 로 바꾼 뒤, 구름감쇠 A_c 를 식 (11)에 대입하여 김포와 싱가포르 지역 대기환경에 의

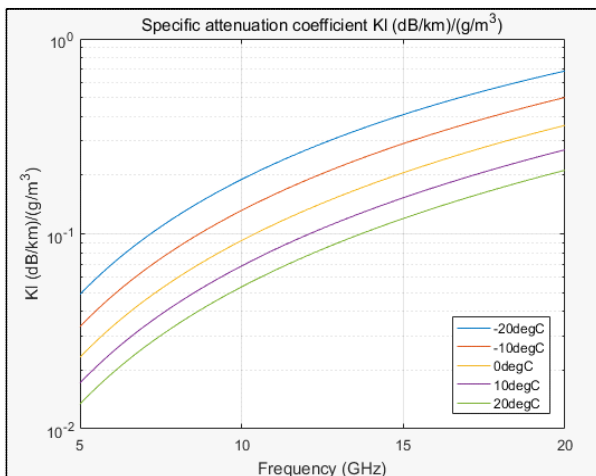


그림 3. 구름감쇠계수

Fig. 3. Specific attenuation coefficient of cloud.

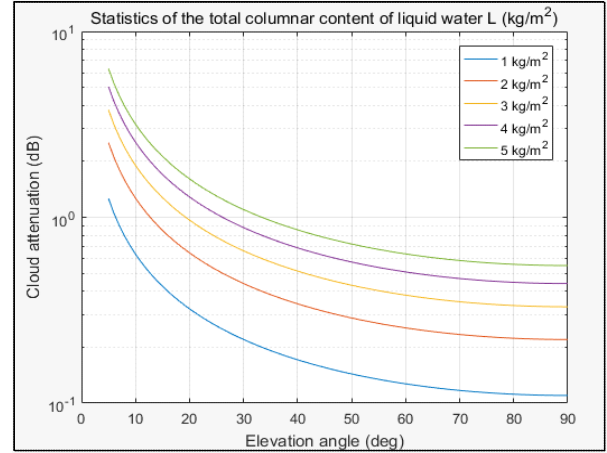


그림 4. 양각 5~90°에서의 구름감쇠(dB)

Fig. 4. Cloud attenuation at elevation 5~90 deg(dB).

한 잡음온도 T_{SKY} 를 계산한 결과는 표 5와 같다.

2.3 안테나 잡음온도

맑은 하늘에서의 안테나 잡음온도 T_a 는 다음의 적분으로 표현할 수 있다^[2].

$$T_a = \frac{1}{4\pi} \iint g(\Omega) T_b(\Omega) d\Omega \quad (16)$$

여기서 $g(\Omega)$ 은 안테나 이득, $T_b(\Omega)$ 는 휘도온도, $d\Omega$ 는 안테나의 지향각도이다. 본 논문에서는 강우 및 외부 잡음온도 유입에서 요구되는 안테나 이득을 도출하는 것이 목적이므로 식 (16)에서 잡음온도 요소인 양각별 휘도온도를 구하도록 한다. ITU-R P.372-12에서 제시한 12 GHz에서의 휘도온도를 인용한 잡음온도 T_b 는 표 6과 같다.

표 5. 대기환경에 의한 잡음온도(K)

Table 5. Atmospheric environmental temperature(K).

Item	Gimpo	Singapore
Environmental temperature	59.49 K	36.53 K

표 6. 휘도온도(K)

Table 6. Brightness temperature(K).

Item	Gimpo	Singapore
Brightness temperature	8 K	4 K

표 7. 안테나 잡음온도 계산결과(K)

Table 7. Results of antenna noise temperature(K).

City	w/o rainfall	Rainfall 0.5%	Rainfall 0.3%
Gimpo	67.49 K	118.05 K	149.11 K
Singapore	40.53 K	135.51 K	204.85 K

앞 절에서 구한 강우 잡음온도 T_{RAIN} , 대기환경 잡음온도 T_{SKY} 및 휘도온도 T_b 를 식 (1b)에 대입하여 위성 ST-2 (88°E)를 바라보는 양각 30.2°(김포)와 71.4°(싱가포르) 조건에서 안테나에 유입될 수 있는 잡음온도 총합 T_A 를 계산한 결과는 표 7과 같다.

2.4 수신기 잡음온도

수신부는 안테나와 LNA 사이의 임피던스 부정합, 전송선로 손실 및 LNA 잡음온도의 합으로 표현된다. 전송선로 잡음온도 T_t 는 식 (17)로 구할 수 있다.

$$T_t = T_o \left[10^{\left(\frac{A_a + A_t + A_b}{10} \right)} - 1 \right] \quad (17)$$

여기서, A_a 는 안테나 임피던스 부정합에 의한 손실, A_t 는 안테나와 LNA 사이의 전송선로 손실, A_b 는 LNA 입력 임피던스 부정합에 의한 손실로 모두 단위는 dB이다. T_o 는 상온잡음온도로 290 K를 적용하였다^[2]. 수신부는 Ku 대역 저잡음 증폭기인 LNA와 주파수를 950~2,050 MHz로 낮추어주는 주파수 하향변환기인 BDC(Block Down Converter)로 구성된다. 따라서 LNA에 종속 연결된 소자들의 잡음온도 영향을 포함하게 되어, 식 (18)처럼 수신기의 전체 종속 잡음온도로 표현된다. 여기서 T_1 은 LNA의 잡음온도이고, T_2 는 LNA에 종속 연결된 부품들의 잡음온도, G_1 은 LNA의 이득이다^[8].

$$T_{RX} = T_1 + \frac{T_2}{G_1} + \frac{T_3}{G_1 G_2} + \dots \quad (18)$$

본 논문에서는 안테나와 LNA 사이에 길이 2 cm의 원형 도파관 직접 연결구조로 설계하였다. 설계결과인 안테나 $VSWR = 1.56$ ($A_a = 0.21$ dB), $A_t = 0.15$ dB 및 LNA 제조사에서 제공한 $VSWR = 1.65$ ($A_b = 0.27$ dB)를 적용하여 잡음온도 $T_t = 45.27$ K로 변환했다. 수신기 잡음 온

표 8. 수신시스템 잡음온도 계산결과(K)

Table 8. Results of system noise temperature(K).

City	w/o rainfall	Rainfall 0.5%	Rainfall 0.3%
Gimpo	173.46 K	224.02 K	255.08 K
Singapore	146.50 K	241.48 K	310.83 K

도는 잡음지수를 측정하여 $T_{RX} = 58.65$ K ($NF = 0.8$ dB)를 얻었다. 식 (1a)에 2-3절의 결과를 대입하여 강우율 0.3%와 0.5% 조건의 시스템 잡음온도 T_{SA} 는 표 8과 같이 추정하였다.

2.5 요구되는 안테나 최소이득

위성 모뎀의 신호처리에 필요한 최소 E_b/N_o 를 고려하여 안테나 이득 G 를 도출한다. 본 실험에 사용한 위성모뎀은 iDirect 사의 E850 모델이다. $R_b = 45$ Mbps, QPSK 3/4 Rate, 페이로드 $K_b = 11,600$ bit, 프레임심벌 $N_s = 8,370$ bit 일 때 요구되는 최소 E_b/N_o 는 3.0 dB이다. 여기에 필요한 C/N_o 는 다음의 식에 의해 80.9 dBHz로 구했다^[11].

$$\frac{C}{N_o} = \frac{E_b}{N_o} + 10\log(R_b) + 10\log\left(\frac{K_b}{N_s}\right) \quad (\text{dBHz}) \quad (19)$$

전파경로 손실을 계산하여 $C/N_o = 80.9$ dBHz에 필요한 안테나 이득 G 를 다음 식에 의해 계산한다^[8].

$$G = \frac{C}{N_o} - P_E + A_F + A_R + 10\log(T_{SYS}) - 228.6 \quad (20)$$

여기서 P_E 는 위성 실효 등방향 방사전력(dBw), A_R 은 강우 감쇠(dB)이다. A_F 는 전파경로 손실이다^[12]. 김포와 싱가포르 지역에서 위성과의 거리 38,563 km와 36,078 km 및 주파수 12.5 GHz를 식 (21)에 대입하여 206.06 dB 및 205.48 dB의 경로손실을 구했다.

$$A_F = 92.4 + 20\log_{10}(F) + 20\log_{10}(R) \quad (\text{dB}) \quad (21)$$

위성 ST-2(88°E)에서 송출하고 있는 Ku 밴드 K1 빔에 대하여 싱가포르 $P_E = 54.1$ dBw, 김포 $P_E = 47.3$ dBw를 적용 후^[13] 식 (20)을 사용한 안테나 이득 계산결과는 표 9와

표 9. 요구되는 안테나 이득 계산결과(dBi)

Table 9. Calculation results of required antenna gain(dBi).

City	w/o rainfall	Rainfall 0.5 %	Rainfall 0.3 %
Gimpo	33.45 dBi	35.72 dBi	37.19 dBi
Singapore	25.33 dBi	29.71 dBi	33.67 dBi

같다. 싱가포르 사용자의 요구규격인 99.5 %의 통신가용성을 위해 안테나 이득 29.71 dBi가 필요함을 도출했다. 여기서 김포지역의 분석은 양각 비교시험을 위한 참고용으로 계산했다.

III. 구현 및 측정결과

3-1 안테나 구현 및 측정

본 논문에서는 싱가포르 사용자의 요구규격인 높이 24 cm 이하를 준수하기 위하여 상하를 절단한 cut-off 카세그레인 파라볼라 안테나로 설계하였다. 설계된 외형은 350×240 mm의 타원형 주반사판, 원형 부반사판 및 내경 19 mm의 원형 도파관으로 구성하여 안테나 후면에 LNA를 장착하도록 하였다. CST 툴 시뮬레이션을 통해 12.8 GHz에서 30.5 dBi의 이득을 얻었다.

안테나를 제작하여 정보통신산업진흥원의 파필드 안테나 무반사실에서 측정한 결과는 표 10과 같이 12.75 GHz에서 30.3 dBi를 얻어 시뮬레이션 결과보다 약 -0.2 dB 작게 나옴을 확인했다^[14]. 이 차이는 매우 근접한 결과이지만 제작과정에서 미세한 치수차이에 기인한 것으로 추정한다.

표 10. 안테나 이득 측정결과(dBi)^[14]Table 10. Test results of parabola antenna gain(dBi)^[14].

급전편파	H-polarization						V-polarization					
	Azimuth(xz)			Elevation(yz)			Azimuth(xz)			Elevation(yz)		
	Gain		HPBW [deg]	Gain		HPBW [deg]	Gain		HPBW [deg]	Gain		HPBW [deg]
	Peak [dBi]	θ [deg]		Peak [dBi]	ϕ [deg]		Peak [dBi]	θ [deg]		Peak [dBi]	ϕ [deg]	
10.7	27.83	0.00	5.72	27.95	0.00	6.98	28.09	0.00	5.67	28.04	0.00	6.78
11.7	30.10	-1.00	4.88	30.20	0.00	6.61	29.74	-1.00	5.53	29.68	0.00	5.95
12.75	30.27	-1.00	4.63	30.36	-1.00	5.66	30.31	-1.00	4.70	30.13	-1.00	5.53

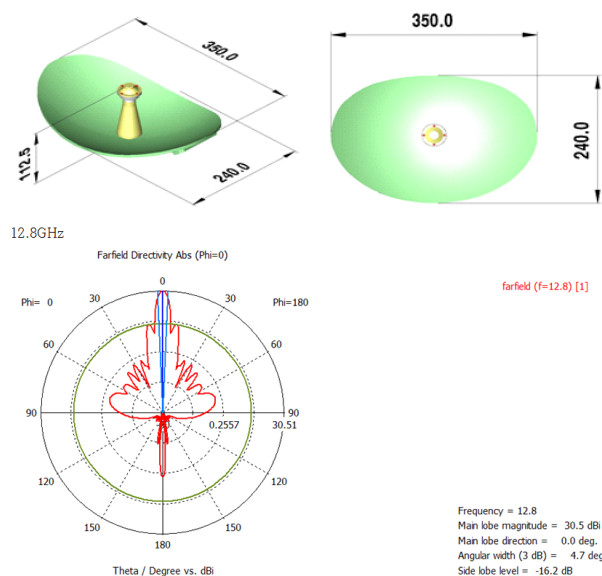


그림 5. 안테나 구성 및 시뮬레이션 결과
Fig. 5. Antenna configuration and simulation results.

3-2 C/N 측정 및 G/T 결과 비교

제작된 안테나를 장착한 위성 단말기를 사용해서 김포와 싱가포르에서 G/T 측정을 하였다. 위성 ST-2(88°E)에서 송출하고 있는 Ku 밴드 12.50025 GHz 무변조 CW 비콘신호 14.0 dBw를^[13] 단말기에서 수신된 C/N을 측정하는 직접 측정방식으로 진행하였다. 이 방식을 선택한 이유는 위성에서 송출하고 있는 비콘신호의 출력과 안테나의 측정이득을 알고 있어서 C/N 측정으로 G/T를 계산할 수 있기 때문이다. 객관적인 gau감쇠 변수를 적용하기가 매우 힘들기 때문에 맑고 쾌청한 날 측정하였으며^[15] 강

표 11. G/T 예측(dBK^{-1})

Table 11. G/T prediction results(dBK^{-1}).

City	w/o rainfall	Rainfall 0.5 %	Rainfall 0.3 %
Gimpo	7.9 dBK^{-1}	6.7 dBK^{-1}	6.2 dBK^{-1}
Singapore	8.7 dBK^{-1}	6.4 dBK^{-1}	5.3 dBK^{-1}

우감쇠는 0 dB를 적용했다. 안테나의 측정된 이득 30.3 dBi를 적용하여 식 (22)에 의한 G/T 추정결과는 표 11과 같다^[8].

$$\frac{G}{T} = G_A - 10 \log_{10}(T_{SYS}) \quad (\text{dBK}^{-1}) \quad (22)$$

비콘신호 C/N 측정 장비의 구성은 그림 6과 같다. 스펙트럼 아날라이저 RBW 1 KHz 및 파형 평균 10회로 설정하여 비콘신호의 최대점과 주변의 잡음을 측정하는 방식으로 C/N을 확인하였다. 김포에서 위성 ST-2(88°E)의 비콘신호를 수신한 C/N은 14.67 dB이며, 측정결과는 그림 7과 같다.

동일한 위성 단말기를 싱가포르로 옮겨 측정한 결과는 그림 8과 같으며, 획득한 C/N은 15.95 dB이다.

위의 C/N 측정 결과를 식 (23)을 사용하여 G/T로 변환하였다. 여기서 강우감쇠 $A_R = 0 \text{ dB}$ 로 적용하였다. G/T 추정과 측정의 차이는 김포 $+0.2 \text{ dBK}^{-1}$, 싱가포르 $+0.1$

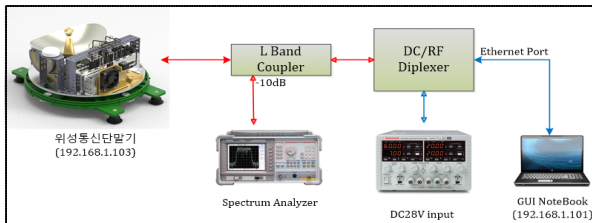


그림 6. C/N 측정 구성도

Fig. 6. C/N measurement configuration.

표 12. C/N 측정결과 및 G/T

Table 12. C/N measurement results & G/T.

City	G/T	C/N	Difference
Gimpo	8.1 dBK^{-1}	14.6 dB	$+0.2 \text{ dBK}^{-1}$
Singapore	8.8 dBK^{-1}	15.9 dB	$+0.1 \text{ dBK}^{-1}$

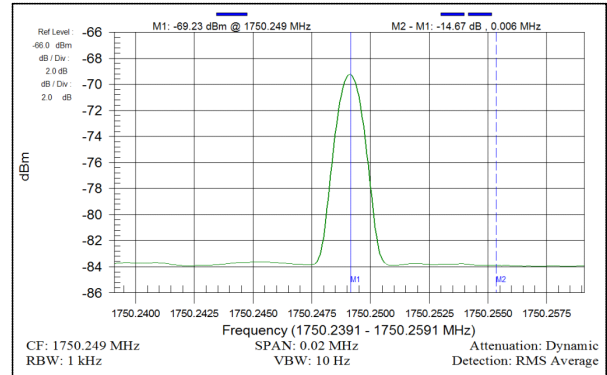


그림 7. 김포에서의 C/N 측정결과

Fig. 7. C/N result in Gimpo.

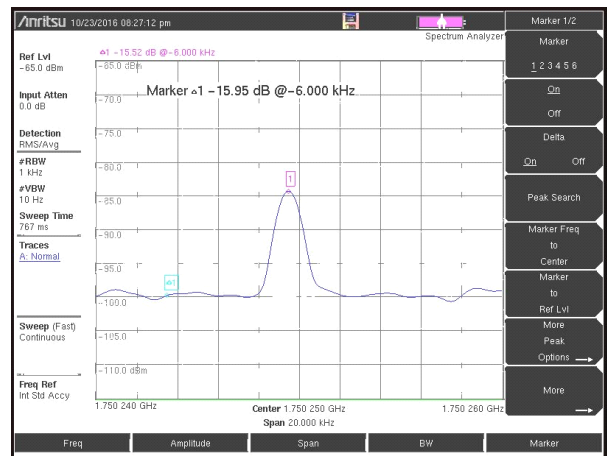


그림 8. 싱가포르에서의 C/N 측정결과

Fig. 8. C/N result in Singapore.

dBK^{-1} 로 매우 근접한 결과를 얻었다.

$$\frac{G}{T} = \frac{C}{N} - P_E + A_F + A_R - 228.6 \quad (23)$$

IV. 결 론

위성신호 수신에 필요한 최소 E_b/N_o 를 만족하는 최적화된 안테나 이득 설계를 위해 전파경로 환경요인들을 분석하였다. ITU-R 권고사항을 기반으로 김포와 싱가포르 지역의 강우량 및 연중평균 강우율에 따른 강우감쇠를 계산하였다. 위성을 바라보는 양각에 따른 잡음온도를 얻기 위해 대기가스, 구름 등에 의한 대기환경 잡음온도

를 분석하였다. 안테나와 LNA의 부정합 손실, 전송선로 손실 및 수신기의 잡음지수 등을 계산하여 수신기 잡음 온도를 얻었다. 이로 인해 연중평균 강우율에 따른 위성 수신시스템 총 잡음온도를 양각별로 계산할 수 있었다. 다음에 위성 모뎀에서 신호처리에 필요로 하는 최소 E_b/N_0 과 싱가포르 사용자 요구규격인 99.5 % 통신 가용성을 만족하기 위해서는 안테나 최소이득이 29.7 dBi가 필요함을 도출하였다. 이를 기반으로 CST 툴 시뮬레이션으로 안테나를 설계하였고, 안테나를 제작 측정하여 30.3 dBi의 결과를 얻었다. 양각과 G/T 관계를 실험하기 위해 제작된 안테나를 장착한 위성 단말기를 갖고, 김포($\theta = 30.2^\circ$)와 싱가포르($\theta = 71.4^\circ$)에서 위성 ST-2의 비콘 주파수의 C/N을 측정하였다. C/N에서 G/T로 변환하여 추정과 측정결과를 비교하여 분석 및 설계절차의 오류를 검증하였다. 본 논문의 실험을 통해 양각과 G/T의 관계를 확인할 수 있었으며, 강우율 조건을 만족하는 시스템 설계절차의 모형을 수립하였다. 이 절차는 사용지역, 통신 가용성 및 데이터 통신 속도 요구규격을 준수할 수 있는 최적화된 안테나 이득을 도출할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] ITU, *Recommendation ITU-R P.372.12 Radio Noise*, pp. 1-7, 2015.
- [2] ITU, *Handbook on Satellite Communications Third Edition*, Wiley, pp. 53, 496-503, 2002.
- [3] 이해선, "위성통신 이론 및 시스템", 북두출판사, p. 114, 2014.
- [4] ITU, *Recommendation ITU-R P.618.12 Propagation Data and Prediction Methods Required for the Design of Earth-space Telecommunication Systems*, pp. 5-8, 2015.
- [5] ITU, *Recommendation ITU-R P.839.4 Rain Height Model for Prediction Methods*, p. 1, 2013.
- [6] ITU, *Recommendation ITU-R SM.1448 Determination of the Coordination Area around an Earth Station in the Frequency Bands between 100 MHz and 105 GHz*, pp. 38-45, 2000.
- [7] ITU, *Recommendation ITU-R P838-3 Specific Attenuation Model for Rain for Use in Prediction Methods*, pp. 1-8, 2005.
- [8] Dennis Roddy, *Satellite Communications Third Edition*, McGraw-Hill Companies, pp. 311-332, 2001.
- [9] Christian Ho, Stephen Slobin and Kelly Gritton, *Atmospheric Noise Temperature Induced by Clouds and Other Weather Phenomena at SHF Band*, California Institute of Technology, pp. 29-30, 63, 2005.
- [10] ITU, *Recommendation ITU-R P.840.5 Attenuation due to Clouds and Fog*, pp. 1-4, 2012.
- [11] iDirect, *Link Budget Analysis Guide of iDirect Modem*, pp. 8-9, 2009.
- [12] 이경순, 구경현, "다중배열 디지털필터를 이용한 위성 비콘 수신기 설계", 한국전자파학회논문지, 27(10), pp. 909-918, 2016년 10월.
- [13] SingTel Service Division, *ST-2 Technical and Operational Document*, pp. 11, 18, 2011.
- [14] 정보통신산업진흥원, "파라볼라 안테나 시험성적서 (S151124-003)", pp. 1-8, 2015년.
- [15] ITU, *Handbook Spectrum Monitoring*, p. 390, 2011.

이 경 순



1993년 2월: 인천대학교 전자공학과 (공학사)
 2003년 8월: 연세대학교 경영학과 (경영학석사)
 2015년 9월~현재: 인천대학교 전자공학과 박사과정
 2012년 9월~현재: (주)에이애플테크놀로지 연구소

[주 관심분야] 초고주파 회로 및 안테나 설계, 위성통신단말기, 항행전자 시스템 설계

구 경 현



1981년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
 1983년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학석사)
 1991년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학박사)
 1987년 3월~현재: 인천대학교 전자공학과 교수

1999년 7월~2000년 8월: UC San Diego 방문학자
 2001년 1월~2002년 12월: 마이크로파 및 전파전파연구회 위원장
 2008년 1월~2009년 12월: 통신소사이어티 회장
 1997년 1월~현재: 한국전자파학회 국문/영문 논문지 편집위원, 평의원, 논문지 편집이사, 학술이사, 총무이사, 재무이사, 부회장, 학회장, 명예회장
 [주 관심분야] 마이크로파 회로 및 안테나 설계, 전파 신호처리, 항행 시스템 설계