

1 ~ 6 GHz 대역 수풀손실 특성 측정 및 모델링

°박용호*, 정명원**, 한일탁**, 백정기*

충남대학교 공과대학 전파공학과*, 충남대학교 공과대학 정보통신공학부**

yhpark78@cnu.ac.kr, rcnairgo@hotmail.com, plus0608@nate.com, jkpack@cnu.ac.kr

Measurement and Modeling of Vegetation Loss in the Frequency Range of 1 ~ 6 GHz

°Yong-Ho Park*, Il-Tak Han**, Myoung-Won Jung**, Jeong-Ki Pack*

Dept. of Radio Science & Engineering, Chungnam Nat'l University*,

Faculty of Information and Communication Engineering, Chungnam Nat'l University**

Abstract

Attenuation in vegetation is important, for both terrestrial and earth-space systems. However, the wide range of conditions and types of foliage makes it difficult to develop a generalized prediction procedure. Currently, there is also a lack of suitably prediction model and measured experimental data for vegetation loss. So in this paper, vegetation loss data for four different tree-species, including Dawn-redwood tree, Plane tree, Pine tree and Fir tree are obtained by measurement in the frequency range of 1.0 ~ 6.0 GHz. The through or scattered component is calculated using a model based upon the theory of RET(Radiative Energy Transfer) and RET modeling parameters are extracted from the measured data.

key words : vegetation loss, RET, vegetation

I. 서론

수풀 감쇠는 환경에 따라 지상 및 위성 시스템 모두에 중요한 역할을 한다. 그러나 수풀 감쇠를 일으키는 수풀의 환경이나 조건들이 광범위하므로 수풀 감쇠 예측 절차를 일반화 시키는 것이 어렵다. 현재 국제적으로도 수풀손실 예측모델이나 측정 데이터가 매우 부족하다. 수풀손실은 수풀지역(Woodland)에 대한 모델과 단일수풀(Single vegetation)에 대한 모델로 구분된다. 단일수풀에 대한 모델의 경우 기존의 단순한 모델의 문제점을 보완하여 2004년 ITU-R 회의에서 RET(Radiative Energy Transfer) 모델에 근거한 새로운 모델이 채택되었다[1].

ITU-R 권고안에 제시되어 있는 수풀 손실 모델의 국내 수풀 환경에 대한 타당성을 검증하고, 다양한 종류의 수풀에 대한 추가 데이터 확보를 위해 수풀 손실 측정 및 기존 예측 모델과의 비교 연구가 필요하다.

따라서 본 논문에서는 ITU-R 표준화 작업과 병행하여 1 GHz 이상의 주파수 대역에서 국내 수풀 및 가로환경에 많이 분포하는 소나무(Pine tree), 전나무(Fir tree), 플라타너스나무(Plane tree), 메타나무(Dawn-redwood tree) 등의 수풀에 대한 수풀손실 특성 측정 및 모델링 연구를 수행하였다.

II. 수풀 손실 모델

2.1 수풀지역(Woodland) 적용 모델

ITU-R 권고안에서 지상 무선 경로에서 송수신기 중 한쪽이 수풀지역 내부에 존재할 경우, 수풀에 의한 초과 손실(excess attenuation)은 식 (1)과 같이 주어진다[1].

$$A_{ew} = A_m [1 - \exp(-d/A_m)] \quad (1)$$

여기서 d 는 수풀지역 내부의 수풀 두께(m), γ 는 단거리 수풀경로의 감쇠계수(dB/m)이다. 또한, A_m 은 최대 감쇠량(maximum attenuation)으로 다음 과 같다.

$$A_m = A_1 f^\alpha \quad (2)$$

여기서 f (MHz)는 주파수이며, 계수 A_1 과 α 는 측정 데이터를 바탕으로 얻어지는 계수 값이다.

수풀경로의 감쇠계수 γ 는 나무의 종류나 밀도에 따라 다르며, 그림 1은 주파수에 따른 감쇠계수의 근사 값 그래프를 나타낸 것이다.

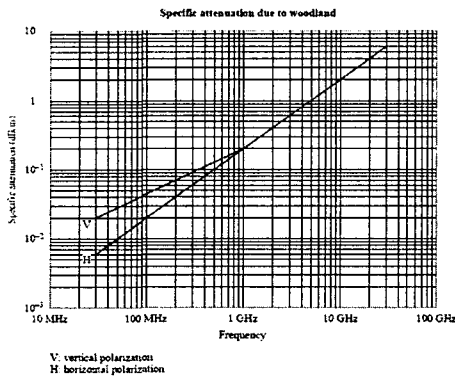


그림 1. 수풀지역의 주파수에 따른 감쇠 특성

2.2 단일 수풀(Single vegetation) 적용 모델

1) 1 GHz 이하 적용 모델

Woodland와 달리 송수신기 모두 수풀 외부에 있는 단일 수풀 모델의 1 GHz 이하 대역에 대한 손실 모델은 식 (1)의 근사를 통해서 다음과 같이 표현된다[1].

$$A_d = d\gamma \quad (3)$$

여기서 d 는 수풀 두께(m), γ 는 단거리 수풀경로의 감쇠계수(dB/m)이다.

2) 1 GHz 이상 적용 모델

ITU-R에서는 1 GHz 이상 대역의 수풀 손실 예측 모델에 대해서 앞서 설명한 식 (1), (3)과 같이 측정을 통한 경험적인 예측 모델과 달리, 나무에 의한 회절 및 지면 반사에 대한 이론적 예측식과 RET이론에 근거한 계산식을 권고안으로 제안하고 있다. RET 기반 모델에서 수풀에 의한 총 손실은 다음과

같이 각 손실의 조합으로 주어진다[1].

$$L_{total} = -10 \log_{10} \left\{ +10 \left(\frac{-L_i}{10} \right) +10 \left(\frac{-L_{ground}}{10} \right) +10 \left(\frac{-L_{sidea}}{10} \right) +10 \left(\frac{-L_{sideb}}{10} \right) \right\} \quad (4)$$

여기서 L_i 는 그림 2에 보인 나무의 윗부분에 의한 회절로서, 독립적인 이중 knife-edge 회절로 근사할 수 있다.

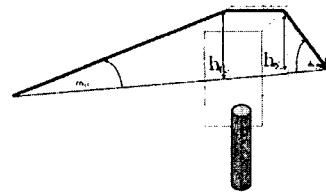


그림 2. 나무 윗부분에 의한 회절

나무 윗부분에 의한 회절 손실은 ITU-R P526[2]에 따라 다음과 같이 주어진다.

$$L_i = 6.9 + 20 \log(\sqrt{(\nu(h_1) - 0.1)^2 + 1} + \nu(h_1) - 0.1) + G_{Tx}(\phi) + 6.9 + 20 \log(\sqrt{(\nu(h_2) - 0.1)^2 + 1} + \nu(h_2) - 0.1) + G_{Rx}(\phi) \quad (5)$$

또한, L_{sidea} 와 L_{sideb} 는 그림 3에 나타낸 나무의 양쪽 측면에 의한 회절손실로서, 독립적인 이중 knife-edge 회절로 근사할 수 있으며, ITU-R P.526[2]으로부터 식 (6)과 같이 주어진다.

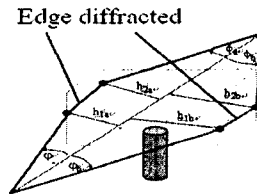


그림 3. 나무 측면에 의한 손실

$$L_{side(a,b)} = 6.9 + 20 \log(\sqrt{(\nu(h_{1(a,b)}) - 0.1)^2 + 1} + \nu(h_{1(a,b)}) - 0.1) + G_{Tx}(\phi_{(a,b)}) + 6.9 + 20 \log(\sqrt{(\nu(h_{2(a,b)}) - 0.1)^2 + 1} + \nu(h_{2(a,b)}) - 0.1) + G_{Rx}(\phi_{(a,b)}) \quad (6)$$

지면에 의한 반사는 경로 길이가 충분히 짧아 그림 4와 같이 모델링 될 수 있는 것으로 가정하면, 지면 반사파에 의한 경로 손실은 식 (7)과 같이 주어진다.

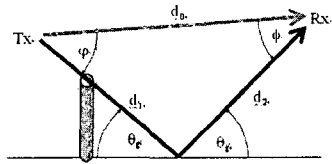


그림 4. 지면에 의한 손실

$$L_{ground} = 20 \log_{10} \left(\frac{d_1 + d_2}{d_0} \right) - 20 \log_{10}(R_0) + G_{Tx}(\phi) + G_{Rx}(\phi) \quad (7)$$

여기서 반사계수 R_0 는 ITU-R P.1238[3]로부터 계산 할 수 있으며, 유전율과 전도율은 ITU-R P.527[4]로부터 계산할 수 있다.

식 (5), (6), (7)의 $G_{Tx}(\phi)$ 와 $G_{Rx}(\phi)$ 는 각각 송수신 안테나의 주어진 방향에 대한 이득을 나타낸다.

III. RET(Radiative Energy Transfer) 모델

식 (4)의 나무에 의한 회절 및 지면반사에 의한 손실을 제외한 나무의 투과와 산란에 의한 손실을 계산하기 위한 RET 이론 모델에서는 수풀을 통계적으로 균일한 랜덤 매질로 모델링하며, 산란 특성을 단위체적당 흡수단면적(σ_a)과 단위체적당 산란단면적(σ_s) 및 매질의 산란함수 $F(\hat{s}, \hat{s}')$ 로 나타낸다. RET 이론의 기본 수식은 식(8)과 같다[5].

$$S \cdot \nabla I(\hat{r}, \hat{s}) + (\sigma_a + \sigma_s) I(\hat{r}, \hat{s}) = \frac{\sigma_s}{4\pi} \int I(\hat{s}', \hat{s}) I(\hat{r}, \hat{s}) d\Omega \quad (8)$$

식 (8)에 주어진 전송 방정식의 해 I 는 다음 식(9)와 같다.

$$I = I_n + I_1 + I_2 \quad (9)$$

여기서, I_n 는 coherent 성분을 나타내며, I_1 및 I_2 는 산란함수의 전방 성분(forward lobe) 및 등방성 배

경 산란(background scattering) 성분으로 표현된다 [참고자료처리]. 이때의 I_n, I_1, I_2 는 다음과 같다. I_2 의 표현식은 본 연구를 통해 ITU-R 권고서의 수식 오류를 수정한 것이다.

$$I_n = e^{-\tau}$$

$$I_1 = \frac{\Delta\gamma_R^2}{4} \left\{ [e^{-\tau} - e^{-\tau}] \overline{a_M} + e^{-\tau} \sum_{m=1}^M \frac{1}{m!} (\alpha W)^m \overline{[a_m - a_M]} \right\}$$

$$I_2 = \frac{\Delta\gamma_R^2}{2} \left\{ -e^{-\tau} \frac{1}{P_N} + \sum_{k=\frac{N+1}{2}}^N \left[A_k e^{-\frac{\tau}{s_k}} \frac{1}{1 - \frac{\mu_N}{s_k}} \right] \right\} \quad (10)$$

식 (10)의 I_1 의 $\Delta\gamma_R$ 은 수신안테나의 3dB 빔폭을 나타내며(3dB 빔폭 $\times 0.6$), I_2 의 감쇠 계수 s_k 는 다음의 특성 방정식의 고유값에 해당한다..

$$\frac{W}{2} \sum_{n=0}^N \frac{P_n}{1 - \frac{\mu_n}{s}} = 1 \quad (11)$$

위 식에서

$$W = \frac{(1-a)W}{1-aW}, \quad \mu_n = -\cos\left(\frac{n\pi}{N}\right)$$

$$P_n = \sin^2\left(\frac{\pi}{2N}\right) \quad \text{for } n=0, N$$

$$P_n = \sin\left(\frac{\pi}{N}\right) \sin\left(\frac{n\pi}{N}\right) \quad \text{for } n=1, 2, 3, \dots, N-1$$

이며, A_k 는 고유값 s_k 에 대한 고유벡터로서 다음의 선형방정식으로부터 구할 수 있다.

$$\sum_{k=\frac{N+1}{2}}^N \frac{A_k}{1 - \frac{\mu_n}{s_k}} = \frac{\delta_{nN}}{P_N} \quad \text{for } n = \frac{N+1}{2} \dots N \quad (12)$$

여기서 δ_{nN} 은 Kronecker delta 이다.

RET 이론 모델을 이용한 수풀의 투과 및 산란에 의한 손실 예측 모델 표현식은 아래와 같이 주어진다[1].

$$L_{scat} = -10 \log_{10} \left(\frac{P_R}{P_{max}} \right) = -10 \log_{10}(I) \quad (11)$$

RET 기반 모델의 입력 파라미터는 총 6개로 표 1과 같다. 표 1의 입력 파라미터 중에서 수풀의 깊이와 수신안테나의 빔폭은 주어지는 값이다. 파라미터 값은 수풀손실의 초기 기울기(Initial slope)로부터 먼저 σ_r 값 ($= \Delta A / (-4.43 \Delta d)$)을 구한 후 α, β, W 는 수풀의 깊이에 의한 손실 특성으로부터 피팅시킴으로써 결정할 수 있다.

표 1. RET 모델 입력파라미터

α	전방산란 전력과 전체산란 전력의 비
β	위상함수(Phase function)의 빔폭
σ_r	합성 흡수 및 산란 계수
W	Albedo
$\Delta\gamma_R$	수신 안테나 빔폭
d	수풀의 깊이[m]

IV. 수풀손실 특성 분석 및 모델링

앞에서 언급한 RET 기반 모델에 대한 파라미터 값을 계산하기 위한 측정을 실시하였다. 수풀 외부에 송신 안테나를 설치하여 수풀 깊이에 따른 주파수별 손실 특성을 측정하였으며, 그림 5는 측정 예시도를 나타낸 것이다.

측정에 사용된 송수신 안테나의 주파수별 빔폭은 다음 표 2와 같다.

표 2. 수신 안테나의 주파수별 빔폭

주파수(GHz)	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5
빔폭(deg)	48	44	51	37	37

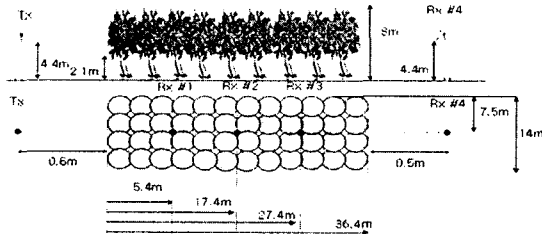


그림 5. 측정 예시도

그림 6은 측정결과 4개 수종에 대한 수풀 깊이에

따른 주파수별 손실 그래프를 나타낸 것이다.

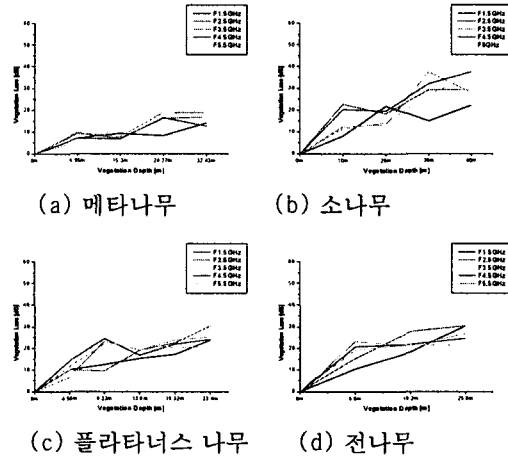


그림 6. 수풀 두께에 따른 주파수별 측정 데이터

측정 데이터를 바탕으로 수풀 깊이에 따른 측정 데이터와 RET 기반 모델을 이용해 도출한 $\sigma_r, \alpha, \beta, W$ 값은 표 3과 같다. 참고로 3.5 GHz에 대한 피팅 결과를 그림 7에 보였다.

표 3. RET 모델 파라미터 값

주파수(GHz)	Plane	Fir	Pine	Meta
1.5	0.490	0.275	0.215	0.261
2.5	0.486	0.402	0.617	0.350
3.5	0.513	0.603	0.334	0.370
4.5	0.691	0.540	0.545	0.266
5.5	0.558	0.502	0.310	0.200

(a) σ_r 값

주파수(GHz)	Plane	Fir	Pine	Meta
1.5	0.95	0.48	0.70	0.93
2.5	0.74	0.74	0.82	0.82
3.5	0.85	0.92	0.74	0.85
4.5	0.75	0.91	0.72	0.89
5.5	0.70	0.96	0.73	0.82

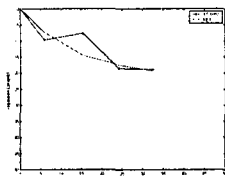
(b) α 값

주파수(GHz)	Plane	Fir	Pine	Meta
1.5	61	51.5	70	44
2.5	23	77.5	55	71
3.5	105	103	72	65
4.5	65	94	71	34
5.5	77	100	75	77

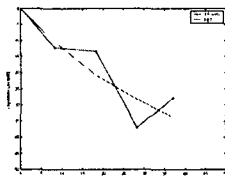
(c) β 값

주파수(GHz)	Plane	Fir	Pine	Meta
1.5	0.88	0.43	0.78	0.98
2.5	0.71	0.71	0.92	0.97
3.5	0.84	0.87	0.71	0.93
4.5	0.95	0.92	0.87	0.99
5.5	0.96	0.97	0.75	0.94

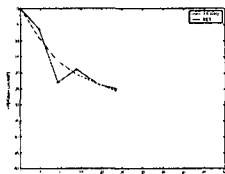
(d) γ 값



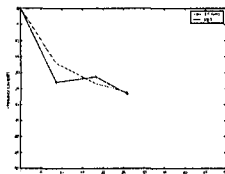
(a) 메타나무



(b) 소나무



(c) 플라타너스 나무



(d) 전나무

그림 7. 3.5 GHz 측정데이터 피팅 결과 그래프

참고문헌

[1] ITU-R "Attenuation in vegetation", ITU-R Rec P.833, 2004
 [2] ITU-R "Propagation by diffraction", ITU-R Rec P.526, 2003
 [3] ITU-R "Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 900 MHz to 100 GHz", ITU-R Rec P.1238, 2003
 [4] ITU-R "Electrical characteristics of the surface of the earth", ITU-R Rec P.526, 2003
 [5] JOHNSON, R. A., SCHWERING, F., "A transport theory of millimeter wave propagation in woods and forests", CECOM-TR-85-1, FortMonmount, New Jersey, 1985

V. 결론

본 논문에서는 ITU-R SG3J P.833 표준화 연구와 병행하여 1 ~ 6 GHz 대역 국내 가로 및 수풀환경에 대한 측정 및 모델링 연구를 수행하였다. 측정 및 모델링 연구와 병행한 RET 이론의 검증 결과 기존 권고 모델의 수식적 문제점을 발견하여 권고서를 수정하였다.

그리고 국내에 분포하는 플라타너스 나무, 메타나무, 소나무, 전나무에 대한 손실 측정 데이터와 이를 바탕으로 RET 기반 모델 입력 파라미터 α_r , α , β W 값을 피팅을 통해 구하였다. 본 연구 결과는 2005년 ITU-R SG3 회의에서 권고서에 반영되었으며, P.311 databank에 등록된 측정 데이터와 함께 수풀 손실 예측 모델로 활용될 것이다.

향후, 다양한 수종에 대한 측정 및 모델링을 통하여 RET 기반 모델의 입력 파라미터를 도출할 계획이며, 추가적으로 바람 등에 의한 dynamic 특성에 대한 연구가 필요한 것으로 생각된다.

M E M O