

1~6 GHz 대역 수풀 손실 특성 측정 및 모델링

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

한 일 탁 · 정 명 원 · 백 정 기

Il-Tak Han · Myoung-Won Jung · Jung-Ki Pack

요 약

현재 국제적으로 수풀 손실 예측 모델이나 측정 데이터가 매우 부족하다. 본 논문에서는 2005년과 2006년, 2년에 걸쳐 1~6 GHz 대역 국내 수풀 및 가로 환경에 많이 분포하는 소나무(pine tree), 히말라야시다(himalaya cedar), 플라타너스나무(plane tree), 메타나무(dawn-redwood tree) 등의 수풀에 대한 수풀 손실 특성 측정 수행 결과로부터, ITU-R P.833에서 제시하고 있는 RET(radiative energy transfer) 모델 파라미터를 도출하였으며, 모델 보정을 시도하였다. 본 연구 결과는 2005년, 2006년 ITU-R SG WP 3J 회의에서 권고서에 반영되었다.

Abstract

Currently, there is a lack of suitable prediction model and measurement data for vegetation loss. So in this paper, vegetation loss measurement has been performed for seven different tree-species, including dawn-redwood tree, plane tree, pine tree and himalaya cedar in the frequency range of 1.0~6.0 GHz, for the two years, from 2005 to 2006 years. And then, extraction and revision for the proposed RET model input parameters in ITU-R P.833 has been performed. The key results of measurement and RET modeling has been presented in this paper. The results of this study have been adapted for ITU-R recommendation at the ITU-R meeting in 2005 and 2006.

Key words : Vegetation, Vegetation Loss, RET Model, RET Parameters

I. 서 론

수풀 감쇠는 이동 및 고정 무선 통신 시스템에 중요한 역할을 한다. 그러나 수풀 감쇠를 일으키는 수풀의 환경이나 조건들이 광범위하므로 수풀 감쇠 예측 절차를 일반화 시키는 것이 어렵다. 현재 국제적으로 수풀 손실 예측 모델이나 측정 데이터가 매우 부족하며, 이에 따른 연구가 필요하다.

수풀 손실은 수풀 지역(woodland)에 대한 모델과 단일 수풀(single vegetation)에 대한 모델로 구분된다. 현재 단일 수풀에 대한 수풀 감쇠 예측 모델과 관련하여 ITU-R에서는 2004년 ITU-R 회의에서 영국이

제안한 RET(Radiative Energy Transfer) 모델과 모델 파라미터를 채택하여 권고하고 있다^[1]. 그러나 ITU-R 권고서에는 유럽의 제한된 수종에 대한 모델 파라미터만이 주어져 있기 때문에 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 2005, 2006년 2년 동안 수행한 소나무(pine tree), 히말라야시다(himalaya cedar), 플라타너스(plane tree), 메타나무(dawn-redwood), 은행나무(ginkgo tree), 벚나무(cherry tree), 중국단풍(tri-

충남대학교 전파공학과(Department of Radio Science and Engineering, Chungnam National University)

· 논문 번호 : 20061219-157

· 수정완료일자 : 2007년 1월 12일

dent maple tree)에 대한 수풀 손실을 측정하였고, 측정 결과를 바탕으로 국내 고유 수중에 대한 RET 모델 파라미터를 도출하였으며, ITU-R P.833에서 제시하고 있는 RET 모델 파라미터에 대한 검증과 모델 보정을 시도하였다.

II. 수풀 손실 예측 모델

2-1 수풀 지역(Woodland) 적용 모델

수풀 지역 내에 송·수신기 중 한 쪽이 존재하는 경우, 수풀에 의한 초과 손실(excess attenuation)은 다음과 같이 나타낼 수 있다^[1].

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

여기서 d 는 수풀 지역내의 경로 길이(m)이며, γ 는 단거리 수풀 경로에서의 에너지 산란에 의한 감쇠계수(dB/m)로 수풀의 수종과 밀도에 의존한다. 그림 1은 측정 데이터를 바탕으로 한 주파수에 따른 감쇠계수 γ 의 근사값 그래프를 나타낸 것이다.

식 (1)에서 A_m 은 수풀 윗 부분의 표면과 전파 및 수풀 내부의 전방 산란에 의한 전파 경로상의 최대 추가 감쇠(maximum additional attenuation: dB)를 나타낸다. A_m 은 수풀의 수종과 밀도에 의존하며 식 (2)와 같이 주어진다.

$$A_m = A_1 f^a \quad (dB) \quad (2)$$

여기서 f (MHz)는 주파수이며, 계수 A_1 과 a 는 특정

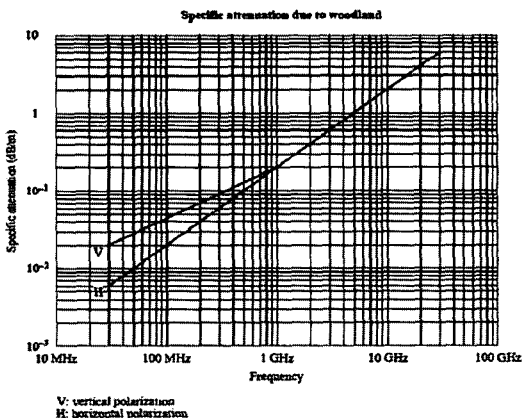


그림 1. 수풀 지역에서의 감쇠 특성
Fig. 1. Specific attenuation due to woodland.

수중에 대한 측정 데이터를 바탕으로 수식 (2)를 피팅시킴으로서 얻어지는 계수 값으로 권고서 P.833에서는 적용 주파수 범위에 따라 값을 달리 권고하고 있다^[1].

2-2 단일 수풀(Single Vegetation) 적용 모델

2-2-1 1 GHz 이하 적용 모델

수풀 지역과 달리 송·수신기 모두 수풀 외부에 있는 단일 수풀 모델의 경우, 식 (1)은 적용할 수 없다. 그러나 감쇠계수가 상대적으로 낮은 값을 가지고 경로상의 수풀 부분이 상대적으로 짧은 VHF와 UHF 대역에서는 식 (1)을 근사시킨 모델을 사용할 수 있다. 따라서 1 GHz 이하 대역에 대한 손실 모델은 식 (1)의 근사를 통해서 다음과 같이 표현된다^[1].

$$A_{et} = d\gamma \quad (dB) \quad (3)$$

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

2-2-2 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 모델을 사용할 수 없기 때문에 RET 이론에 근거한 수풀의 산란 손실 계산식과 기존의 수풀에 의한 회절 및 지면 반사에 대한 이론적 예측 식을 권고 모델로 제안하고 있다. 수풀 손실 값에 대한 전파 메커니즘을 그림 2에 나타내었다.

그림 2에 보인 전파 메커니즘을 바탕으로 수풀에 의한 총 손실은 다음과 같이 각 손실의 조합으로 주

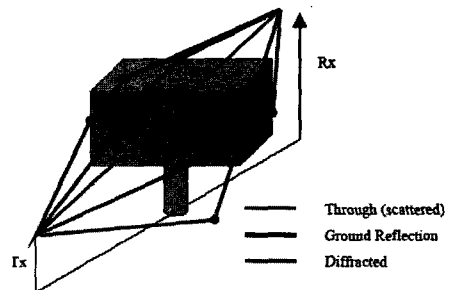


그림 2. 수풀에 의한 전파 메커니즘
Fig. 2. Mechanisms of propagation associated with vegetation.

어진다^[1].

$$L_{total} = -10 \log_{10} \left\{ \begin{array}{l} 10 \left(\frac{-L_{sidea}}{10} \right) + 10 \left(\frac{-L_{sideb}}{10} \right) \\ + 10 \left(\frac{-L_t}{10} \right) + 10 \left(\frac{-L_{ground}}{10} \right) \\ + 10 \left(\frac{-L_{scat}}{10} \right) \end{array} \right\} \quad (4)$$

여기서 L_t 는 나무의 윗 부분에 의한 회절 손실이며, L_{sidea} 와 L_{sideb} 는 나무의 측면에 의한 손실, 그리고 L_{ground} 는 지면에 의한 반사 성분으로 ITU-R P.833^[1], ITU-R P.526^[2], ITU-R p.1238^[3], ITU-R P.527^[4]로부터 구할 수 있다.

2.3 RET 모델

식 (4)의 나무에 의한 회절 및 지면 반사에 의한 손실을 제외한 나무의 투과와 산란에 의한 손실을 계산하기 위한 RET 이론 모델에서는 수풀을 통계적으로 균일한 랜덤 매질로 모델링하며, 산란 특성을 단위체적당 흡수 단면적(σ_a)과 단위체적당 산란 단면적(σ_s) 및 매질의 산란 함수 $P(\zeta, \zeta')$ 로 나타낸다. RET 이론의 기본 수식은 식 (5)와 같다^[5].

$$S \cdot \nabla K(\zeta, \zeta) + (\sigma_A + \sigma_S)K(\zeta, \zeta) = \frac{\sigma_S}{4\pi} \int P(\zeta, \zeta')K(\zeta, \zeta')d\Omega \quad (5)$$

식 (5)에 주어진 전송 방정식의 해 I 는 다음 식 (6)와 같다.

$$I = I_n + I_1 + I_2 \quad (6)$$

여기서, I_n 는 coherent 성분을 나타내며, I_1 과 I_2 는 산란함수의 전방 성분(forward lobe)과 등방성 배경 산란(background scattering) 성분이다^[5]. 수풀 손실 모델링 과정에서 ITU-R 권고식 중 I_2 에 대한 수식 오류를 발견하여 부록에 주어진 것과 같이 관련 수식을 유도하였고 ITU-R 권고서에 이를 반영시켰다. I_n , I_1 , I_2 에 대한 표현식은 다음과 같다.

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

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

$$I_2 = \frac{\Delta\gamma_R^2}{2} \left\{ -e^{-\tau} \frac{1}{P_N} + \sum_{k=N/2}^N \left[A_k e^{-\frac{\tau}{s_k}} \frac{1}{1 - \frac{\mu_N}{s_k}} \right] \right\} \quad (7)$$

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

$$L_{scat}(dB) = -10 \log_{10} \left(\frac{P_R}{P_{max}} \right) = -10 \log_{10}(I) \quad (8)$$

그림 3는 RET 기반 모델의 각 항에 대한 시뮬레이션 결과 그래프를 나타낸 것이다.

RET 모델로부터 수풀에 의한 감쇠를 예측하기 위해서는 표 1에 주어진 6개의 RET 입력 파라미터가 필요하다.

표 1의 입력 파라미터 중 4개의 파라미터는 산란 매체(vegetation)에 의한 특성이며, 2개의 파라미터는 수신 안테나 특성과 경로 구조에 의해 정해지는 값이다. 파라미터 값은 수풀 손실의 초기 기울기(initial slope)로부터 먼저 σ_s 값($= \Delta A / (-4.43 \Delta d)$)을 구하고 측정을 통한 수풀의 깊이에 따른 손실 특성에 RET 모델의 α , β , W 를 피팅시킴으로서 도출할 수 있다.

III. 수풀 손실 측정

3-1 측정 방법

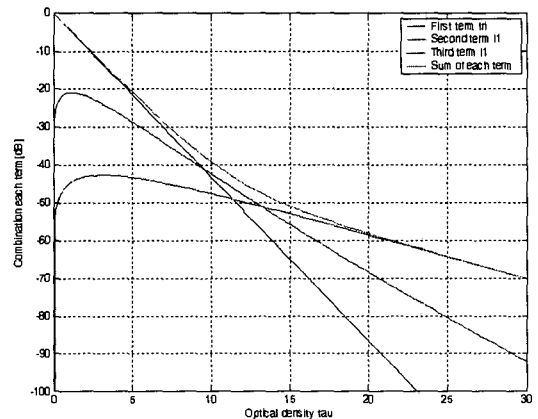


그림 3. RET 기반 모델의 시뮬레이션 결과
Fig. 3. The result of simulation for the RET model.

표 1. RET 모델 입력 파라미터

Table 1. RET input parameters.

α	전방 산란 전력과 전체 산란 전력의 비
β	위상함수(Phase function)의 빔 폭
σ_r	흡수 및 산란 계수의 합
W	Albedo
$\Delta \gamma_R$	수신 안테나 빔 폭
d	수풀의 깊이[m]

RET 모델 파라미터를 도출하기 위하여 국내 가로 환경에 많이 분포하는 소나무, 메타나무, 플라타너스, 히말라야시다, 은행나무, 벚나무, 중국단풍에 대한 수풀 손실 특성 측정을 수행하였다. 앞서 언급한 바와 같이 RET 모델 파라미터를 도출하기 위해서는 수풀에 의한 회절과 지면에 의한 반사 손실의 영향이 없어야 한다. 따라서 측정 장소 선택에 있어 안테나의 빔 폭이 수풀의 폭에 포함될 수 있도록 하기 위하여 충분히 넓은 폭을 가지며, 단일 수종으로 이루어진 군락을 선택하였다. 그림 4는 벚나무의 실제 측정 장소에 대한 사진이다.

수풀 손실 측정은 수풀의 거리에 따른 감쇠 특성을 얻기 위하여 수풀 안에서 거리가 다른 여러 포인트에서 3분간 측정 데이터를 기록하면서 측정을 수행하였다. 또한 지면에 의한 반사의 영향을 제거하기 위하여 송신 안테나와 수신 안테나를 지면으로부터 4 m 이상 떨어진 높이에 설치하여 측정을 수행하였다. 다음의 그림 5는 측정 예시도를 나타낸 것이며, 표 2은 측정에 사용한 안테나의 주파수별 빔 폭을 나타낸 것이다.

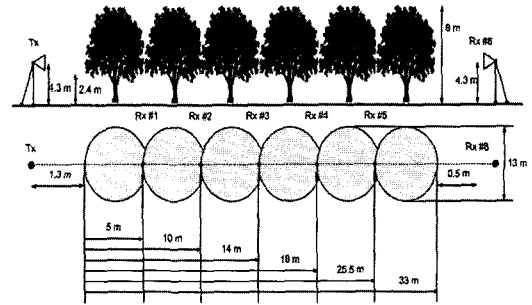


그림 5. 측정 예시도

Fig. 5. Measurement geometry.

표 2. 수신 안테나의 주파수별 빔 폭

Table 2. Beamwidth of antenna with frequency.

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

IV. 측정 결과 및 모델링

4-1 측정 결과

다음의 그림 6은 측정 결과를 수풀의 깊이와 주파수에 따른 손실 값으로 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 거리에 따라 손실 값이 커짐을 알 수 있고, 일정한 수풀의 깊이에서는 수풀의 산란에 의해 손실 값이 수렴해 가는 것을 확인할 수 있다.

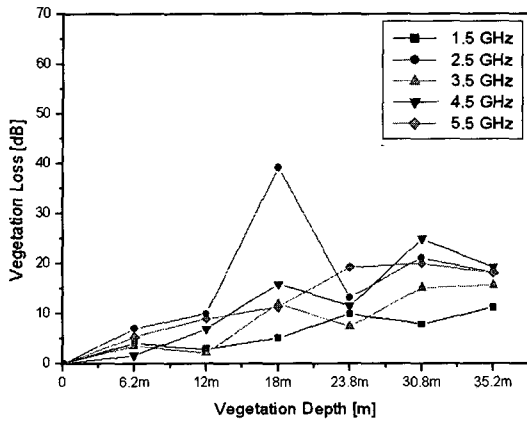
측정 결과 수풀 깊이가 짧은 구간에서는 수풀에 의한 감쇠율(attenuation rate)이 수풀 깊이가 긴 구간에 비해 큰 것을 알 수 있다. 이는 수풀 깊이가 짧은 구간에서의 수신 신호는 coherent 성분인 직접파에 의해서 결정되며, 수풀 깊이가 긴 구간에서는 incoherent 성분인 수풀에 의한 산란파로 수신 신호가 결정되기 때문이다.

또한 주파수가 높을수록 감쇠가 큰 것은 상대적으로 파장이 짧은 높은 주파수 신호가 낮은 주파수 신호보다 전파 경로 상의 더 많은 수풀내의 산란체를 통과하게 되고 이로 인해 상대적으로 큰 수풀에 의한 감쇠가 일어나는 것으로 이해된다. 단, 2.5 GHz 대역 손실이 상대적으로 큰 경우가 있으며, 영국의 측정 데이터도 유사한 경향을 보인다^[5]. 이것은 나무 줄기나 가지 등의 영향이 이 주파수 대역에서 크게 나타나는 것으로 생각되며, 주파수에 따른 나무의 각

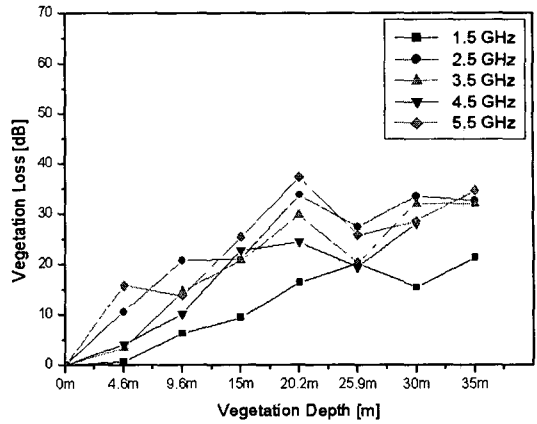


그림 4. 측정 장소(벚나무)

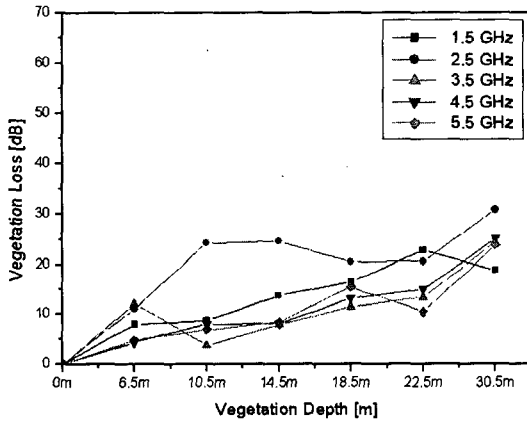
Fig. 4. Measurement site(cherry tree).



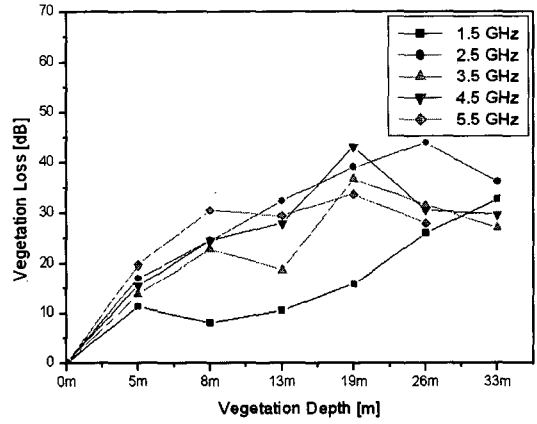
(a) 메타나무
(a) Meta tree



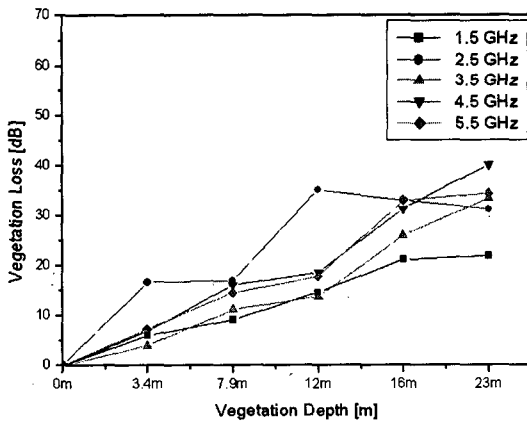
(b) 소나무
(b) Pine tree



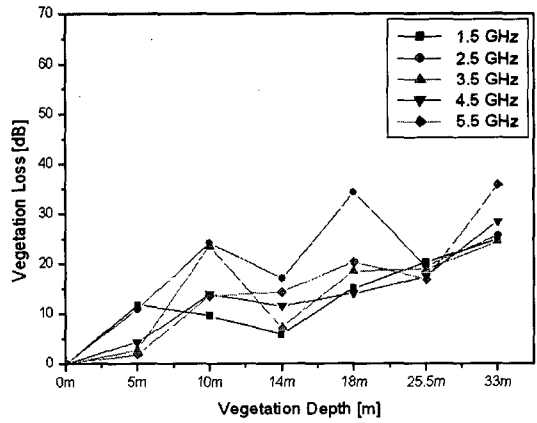
(c) 플라타너스 나무
(c) Plane tree



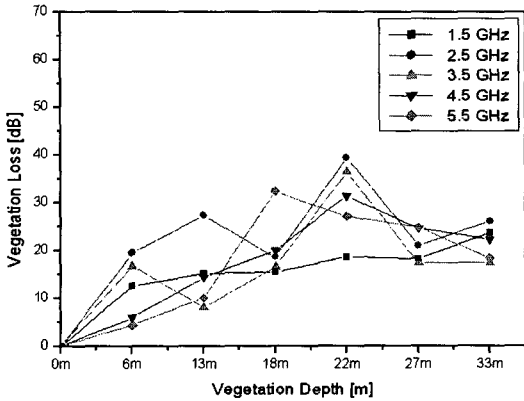
(d) 히말라야시다
(d) Himalaya cedar



(e) 은행나무
(e) Ginkgo tree



(f) 벚나무
(f) Cherry tree



(g) 중국단풍
(g) Trident maple

그림 6. 수풀 깊이에 따른 감쇠 특성
Fig. 6. Attenuation characteristics as a function of the vegetation depth.

부분에 의한 미시적이고 정량적 산란 특성에 대해서는 앞으로 추가의 연구가 필요한 것으로 판단된다.

4-2 RET 모델링

측정을 통해 얻은 데이터를 바탕으로 앞에서 언급한 방법에 의해 수풀 깊이에 따른 측정 데이터와 RET 모델을 피팅시켜 RET 모델 파라미터를 도출하였다. 피팅 방법으로는 아래 식과 같은 least square Fitting을 이용하였다.

$$E_k = \sum_{i=1}^N (E_i^2) \quad (9)$$

여기서 E_i 는 각 포인트에서의 측정 데이터와 RET 모델 예측 값의 차이이며, N 은 측정 포인트의 수를 나타내고 E_k 는 Least Square error를 나타낸다.

그림 7는 3.5 GHz에 대한 중국단풍의 피팅 결과를 예시한 것이며, 표 3은 7개의 수종 중 3개의 대표 수종에 대해 도출한 RET 파라미터를 정리한 것이다.

V. 결 론

본 논문에서는 1~6 GHz 대역 국내 가로 및 수풀 환경에 대한 측정 및 모델링 연구를 수행하여 국내 가로에 많이 분포하는 플라타너스 나무, 메타나무, 소나무, 히말라야시다, 은행나무, 벚나무, 중국단풍

표 3. 도출한 RET 모델 파라미터 값
Table 3. Fitted values of RET model parameters.

(a) α (전체 산란 전력과 전방산란 전력의 비)
(a) α (ratio of the forward scattered power to the total scattered power)

주파수(GHz)	은행나무	벚나무	중국단풍
1.5	0.90	0.95	0.95
2.5	0.90	0.93	0.95
3.5	0.30	0.90	0.95
4.5	0.40	0.90	0.90
5.5	0.40	0.95	0.90

(b) β (위상함수의 빔 폭)
(b) β (beamwidth of the phase function)

주파수(GHz)	은행나무	벚나무	중국단풍
1.5	28.65	57.30	18.47
2.5	36.89	57.30	45.34
3.5	57.30	114.59	13.43
4.5	28.65	114.59	57.30
5.5	28.65	229.18	114.59

(c) W (albedo)
(c) W (albedo)

주파수(GHz)	은행나무	벚나무	중국단풍
1.5	0.95	0.95	0.96
2.5	0.92	0.95	0.95
3.5	0.10	0.95	0.95
4.5	0.83	0.30	0.95
5.5	0.90	0.90	0.95

(d) σ_r (흡수 및 산란 계수의 합)
(d) σ_r (combined absorption and scatter cross-section)

주파수(GHz)	은행나무	벚나무	중국단풍
1.5	0.40	0.30	0.47
2.5	1.10	0.49	0.73
3.5	0.30	0.21	0.73
4.5	0.46	0.20	0.27
5.5	0.48	0.24	0.31

에 대한 RET 모델 파라미터 α , β , W 값을 피팅을 통해 도출하였다. 또한 측정 및 모델링 연구와

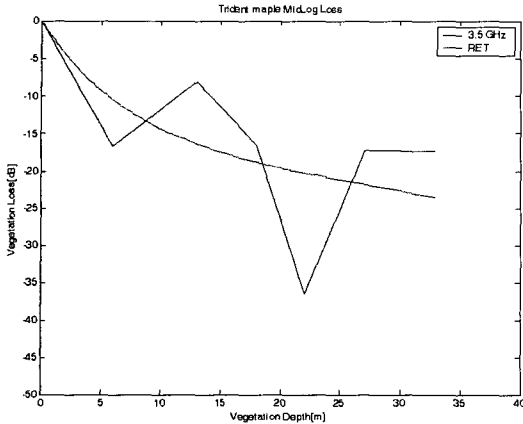


그림 7. 3.5 GHz 측정 데이터 피팅 결과(중국단풍)
Fig. 7. Best fitted result at 3.5 GHz(trident maple tree).

병행한 RET 이론의 검증 결과 기존 권고 모델의 수식적 문제점을 발견하여 권고서의 RET 모델을 수정하였다. 본 연구 결과는 2005년과 2006년 ITU-R SG3 회의에서 채택되어 권고서에 반영되었으며^{[7],[8]}, P.311 databank에 등록된 측정 데이터와 함께 국제적인 수풀 손실 예측 모델로서 활용될 것이다.

그러나 현재 권고서에는 유럽의 제한된 수종과 본 연구를 통해 2005년 2006년 권고서에 기여한 7개 수종에 대한 모델 값만 주어져 있기 때문에 예측 모델의 정확도를 높이기 위해서는 다양한 수종에 대한 측정을 통해 RET 모델 변수 값이 주어져야 한다. 또한 예측 모델의 일반성 확보 및 모델 파라미터의 물리적인 타당성을 위해서는 위상함수(Phase function) 측정을 바탕으로 한 RET 모델링이 필요하며, 이를 위해 12.5 GHz 대역에서 손실 측정과 병행하여 위상함수 측정을 수행하였고 현재 측정 데이터에 대한 모델링과 분석이 진행 중이다.

수풀 손실 예측 모델을 일반화하기 위해서는 다양한 수종에 대한 측정을 통해 확보한 데이터를 바탕으로 한 RET 모델링과 모델 파라미터의 물리적인 타당성, 그리고 모델의 단순화에 대한 연구가 필요하다. 또한 수풀에 의한 페이딩 특성과 관련하여 바람 등에 의한 dynamic 특성 연구와 광대역 신호의 지연 분산 특성에 대한 연구도 필요한 것으로 판단된다.

부 록

RET 모델 수식 유도

송신 안테나가 수풀로부터 충분히 멀리 떨어져 있다고 가정하면 수풀과 자유공간의 경계점에서의 전파는 평면파로 생각할 수 있고, 본문의 식 (1)의 전송 방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} &\mu \frac{\partial I}{\partial z}(z, \theta) + (\sigma_A + \sigma_S)I(z, \theta) \\ &= \frac{\sigma_S}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi p(\gamma)I(z, \theta') \sin \theta' d\theta' d\phi' \\ &\text{for } z > 0, (\mu = \cos \theta) \end{aligned} \tag{A1}$$

여기서 $I(z, \theta)$ 는 specific intensity이며, $p(\gamma)$ 은 phase function으로 다음과 같다.

$$p(\gamma) = a \left(\frac{2}{\Delta\gamma} \right)^2 e^{-\left(\frac{\gamma}{\Delta\gamma}\right)^2} + (1-a) = ap_1 + p_2 \tag{A2}$$

방정식의 경계 조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} I(0, \theta) &= \frac{S_p \cdot \delta(\theta)}{2\pi \sin \theta}, \quad (0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}) \text{ at } z=0 \\ I(z, \theta) &\rightarrow 0 \quad \text{at } z \rightarrow \infty \end{aligned} \tag{A3}$$

여기서 S_p 는 평면파의 포인팅 벡터이다. 전송 방정식의 해는 coherent 성분과 diffusion 성분의 합 $I = I_n + I_d$ 로 나타낼 수 있고 경계 조건과

$$\begin{aligned} I_d(0, \theta) &= 0 \text{ for } 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}, z=0 \\ I_d(z, \theta) &= 0 \text{ for } z \rightarrow 0 \end{aligned} \tag{A4}$$

을 이용하면 식 (A5), (A6)를 얻을 수 있다.

$$I_n = \frac{S_p \cdot \delta(\theta)}{2\pi \sin \theta} e^{-\tau}, (\tau = \sigma_\tau z, \sigma_\tau = \sigma_A + \sigma_S) \tag{A5}$$

$$\mu \frac{\partial I_d}{\partial \tau} + I_d = \frac{W}{4\pi} \text{dint } d\Omega p(I_n + I_d) = J(\tau, \mu) \tag{A6}$$

여기서 $W = \frac{\sigma_S}{\sigma_A + \sigma_S}$ 이고, I_d 는 전방 산란 성분과 등방성 산란 성분의 합 $I_d = I_1 + I_2$ 로 나타내면 식 (A6)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} &\mu \frac{\partial}{\partial \tau} (I_1 + I_2) + (I_1 + I_2) \\ &= \frac{W}{4\pi} \text{dint } d\Omega \left\{ \begin{aligned} &ap_1(I_n + I_1) \\ &+ [p_2(I_n + I_1) + ap_1I_2 + p_2I_2] \end{aligned} \right\} \end{aligned} \tag{A7}$$

식 (A7)의 우변항에서 대괄호 안의 첫 번째 항목은 I_1 에 대한 미분 방정식으로 식 (A8)과 같으며 이에 대한 해는 iterative solution을 이용하면 (A9)와 같이 주어진다.

$$\mu \frac{\partial I_1}{\partial \tau} + I_1 = \frac{\alpha W}{4\pi} \text{dint } d\Omega' p_1(\gamma)(I_n + I_1) \quad (\text{A8})$$

$$I_1(z, \theta) = \frac{S_p}{4\pi} e^{-\tau} \sum_{m=1}^M \frac{1}{m!} (\alpha w \tau)^m q_m(\theta), z > 0 \quad (\text{A9})$$

여기서

$$q_m(\theta) = \frac{1}{m} \left(\frac{2}{\Delta \gamma} \right)^2 \exp \left[-\frac{1}{m} \left(\frac{2}{\Delta \gamma} \right)^2 \right] \quad (\text{A10})$$

M 이 충분히 크다고 하면 다음을 만족한다.

$$\sum_{m=0}^M \frac{1}{m!} (\alpha w \tau)^m \approx e^{\alpha w \tau}, \sum_{m=1}^M \frac{1}{m!} (\alpha w \tau)^m \approx e^{\alpha w \tau} - 1 \quad (\text{A11})$$

따라서 식 (A11)의 관계식으로부터 식 (A9)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_1(z, \theta) = \frac{S_p}{4\pi} \left\{ \begin{array}{l} [e^{-\tau} - e^{-\tau}] q_M(\theta) \\ + e^{-\tau} \sum_{m=1}^M \frac{1}{m!} (\alpha w \tau)^m [q_m(\theta) - q_M(\theta)] \end{array} \right\} \quad (\text{A12})$$

또한 중괄호 안의 항목은 I_2 에 대한 미분 방정식으로 다음과 같다.

$$\mu \frac{\partial I_2}{\partial \tau} + I_2 = \frac{(1-\alpha)W}{4\pi} \text{dint } I_2 d\Omega' + \frac{\alpha W}{4\pi} \text{dint } p_1 I_2 d\Omega + J_S \quad (\text{A13})$$

$$J_S = \frac{(1-\alpha)W}{4\pi} \text{dint } (I_n + I_1) d\Omega \quad (\text{A14})$$

여기서 p_1 이 높은 지향성을 갖는다고 하면 p_1 은 dela 함수로 근사시킬 수 있고, $(1-\alpha w)$ 로 정규화시키면 식 (A13)은 다음과 같이 된다.

$$\mu \frac{\partial I_2}{\partial \tau} + I_2 = \frac{W}{4\pi} \text{dint } I_2 d\Omega' + J_0 \quad (\text{A15})$$

여기서

$$\tau = (1-\alpha w)\tau, \quad W = \frac{(1-\alpha)W}{1-\alpha w}, \quad J_0 = \frac{J_S}{1-\alpha w} \quad \text{이}$$

며, $\text{dint } d\Omega' I_2(\tau, \theta) = 2\pi \int_{-1}^1 d\mu' I_2(\tau, \mu')$ 를 이용하면 식 (A15)는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\mu \frac{\partial I_2}{\partial \tau} + I_2 = \frac{W}{2} \int_{-1}^1 d\mu' I_2(\tau, \mu') + J_0 \quad (\text{A16})$$

식 (A16)을 이산화하여 구분구적법을 이용하면 linear system of equation을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial \tau} I_{2n} + \sum_k S_{nk} I_{2k} = \mathcal{J}_{0n} \quad (\text{A17})$$

여기서 $S_{nk} = \frac{1}{\mu_n} \left(\delta_{nk} - \frac{W}{2} a_k \right)$, $\mathcal{J}_{0n} = J_0 / \mu_n$ 이다

식 (A17)의 해는 다음과 같이 됨을 쉽게 볼 수 있다.

$$I_2(\tau, \mu_n) = \frac{W}{4\pi} S_p \left[\begin{array}{l} \sum_k C_k \frac{-1}{1-\mu_n/s_k} e^{-\tau/\mu} \\ + \sum_k C_k \frac{1}{1-\mu_n/s_k} e^{-\tau/s_k} \end{array} \right] \quad (\text{A18})$$

가우시안 방사 패턴 G_R 을 갖는 수신 안테나에서의 수신 전력은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_r = \frac{\lambda^2}{4\pi} \text{dint } d\Omega' G_R(\tau, \mu') \quad (\text{A19})$$

$$G_R = \left(\frac{2}{\Delta \gamma_R} \right)^2 \exp \left(\frac{-\gamma_R^2}{(\Delta \gamma)^2} \right) \quad (\text{A20})$$

수신 안테나가 높은 지향성을 갖는다고 하면 식 (A5), (A12), (A18)를 이용하여 I_n , I_1 , I_2 에 대한 전력을 계산하면 다음과 같다.

$$P_n = \frac{\lambda^2}{4\pi} S_p \left(\frac{2}{\Delta \gamma_R} \right)^2 e^{-\tau} \quad (\text{A21})$$

$$P_n = \frac{\lambda^2}{4\pi} S_p \left\{ \begin{array}{l} [e^{-\tau} - e^{-\tau}] \overline{q_M}(\theta) \\ + e^{-\tau} \sum_{m=1}^M \frac{1}{m!} (\alpha w \tau)^m [\overline{q_m}(\theta) - \overline{q_M}(\theta)] \end{array} \right\} \quad (\text{A22})$$

여기서 $\overline{q_m} = \frac{4}{\Delta \gamma_R^2 + m \Delta \gamma^2} \exp \left(\frac{-\theta^2}{\Delta \gamma_R^2 + m \Delta \gamma^2} \right)$

$$P_n = \frac{\lambda^2}{4\pi} W S_p \left\{ \begin{array}{l} \frac{2}{W} \sum_k A_k \frac{-1}{1-\mu_n/s_k} e^{-\tau} \\ + \frac{2}{W} \sum_k A_k \frac{1}{1-\mu_n/s_k} e^{-\tau/s_k} \end{array} \right\} \quad (\text{A23})$$

$\tau=0$ 일 때의 최대 전력 P_{\max} 는 식 (A21)로부터 다음과 같다.

$$P_{\max} = \frac{\lambda^2}{4\pi} S_p \left(\frac{2}{\Delta\gamma_R} \right)^2 \quad (A24)$$

따라서 수풀 손실에 대한 RET 모델의 수식은 다음과 같다.

$$\frac{P_r}{P_{\max}} = e^{-\tau} + \left(\frac{\Delta\gamma_R}{2} \right)^2 \left\{ [e^{-\tau} - e^{-\tau}] \overline{q_m(\theta)} + e^{-\tau} \sum_{m=1}^M \frac{1}{m!} (\alpha W \tau)^m [\overline{q_m(\theta)} - \overline{q_m(\theta)}] \right\} + \frac{(\Delta\gamma_R)^2}{2} \left\{ \frac{-e^{-\tau}}{a_N} + \sum_k A_k e^{-\tau/s_k} \frac{1}{1 - \mu_{N/S_k}} \right\} \quad (A25)$$

참 고 문 헌

[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. 527, 2003.
 [5] N. C. Rogers, A. Seville, "A generic model of 1-60 GHz Radio propagation through vegetation", May 2002.
 [6] R. A. Johnson, F. Schwering, "A transport theory of millimeter wave propagation in woods and forests", CECOM-TR-85-1, FortMonmount, New Jersey, 1985.
 [7] ITU-R, WP document, Republic of Korea, no. 3J/102, Oct. 2005.
 [8] ITU-R, WP document, Republic of Korea, no. 3J/160, Oct. 2006.

한 일 탁



2006년 2월: 충남대학교 전자·전파·정보통신공학부 (공학사)
 2006년 3월~현재: 충남대학교 전자공학과 석사과정
 [주 관심분야] 전자파 전파 및 산란, 전파전파 특성 예측 모델링

백 정 기



1978년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
 1985년 9월: Virginia Tech. 전자파 전파 (공학석사)
 1988년 9월: Virginia Tech. 전자파 전파 (공학박사)
 1978년 3월~1983년 2월: 국방과학연구소

1988년 10월~1989년 2월: 한국전자통신연구원
 1989년 3월~1995년 2월: 동아대학교 전자공학과 부교수
 1995년 2월~현재: 충남대학교 전파공학과 교수
 2002년 3월~현재: 충남대학교 전자파환경기술연구(EM-ERC) 센터장
 [주 관심분야] 전자파 전파, 전자파 산란, 전자파 인체 영향

정 명 원



2006년 2월: 충남대학교 전자 전파 정보통신공학부 (공학사)
 2006년 3월~현재: 충남대학교 전파공학과 석사과정
 [주 관심분야] 전자파 전파 및 산란, 전파전파 특성 예측 모델링