

12.5 GHz 대역 위상 함수 특성 측정을 통한 RET 모델링

RET Modelling through the Phase Function Measurement at 12.5 GHz

한일탁 · 배석희* · 정명원 · 백정기

Il-Tak Han · Seok-Hee Bae* · Myoung-Won Jung · Jung-Ki Pack

요 약

현재 ITU-R에서 제시하고 있는 RET(Radiative Energy Transfer) 모델을 이용하여 수풀에 의한 손실을 예측하기 위해서는 6개의 입력 파라미터가 필요하다. 이 중에서 수풀의 산란 특성과 관련된 4개의 파라미터를 도출하는 방법으로는 측정된 거리에 따른 수풀 손실 곡선과 RET 모델의 피팅을 통해 도출하는 방법과 수풀 손실 및 추가의 위상 함수(phase function) 측정을 통해서 도출하는 방법이 있다. 첫 번째 방법을 통해 RET 모델 파라미터를 도출하는 경우 피팅이 상당히 어렵고, 측정 결과로 얻은 수풀 손실 곡선에 따라 유일한 피팅 결과가 도출되지 않는 경우가 있으며, 도출된 파라미터의 물리적 의미도 결여되어 있다. 따라서 본 논문에서는 위상 함수 측정 방법과 위상 함수 측정을 통해 보다 정확하고 물리적인 타당성을 갖는 RET 모델 파라미터를 도출하는 방법, 그리고 이를 이용하여 도출된 RET 모델 파라미터를 제시하였다. 본 논문에서 제시한 RET 모델링 방법, 측정 결과, 측정 결과로부터 도출한 RET 모델 파라미터는 2006년 ITU-R 회의에 기고서로 제출하여 ITU-R 보고서, 개정 권고서로 채택되었다^{[1],[2]}.

Abstract

The prediction for vegetation attenuation using the RET model recommended in the ITU-R requires six RET input parameters. Among these, 4 parameters are related to the scattering characteristics of vegetation. To extract these parameters, two methods can be used. One is to extract the parameters by curve fitting of the measured vegetation-attenuation curve with the RET prediction model, and the other is to use the additional phase function measurement data. In the former method, fitting is quite complex and it does not result in the unique results in some cases. In addition, the extracted parameters lack the physical meaning as well. Thus, in this paper, the measurement method of phase function, and the method of extracting the RET model parameters which lead to more accurate and physically more meaningful results are presented. The extracted RET model parameters are also presented. The RET modeling method, measurement data, and the extracted RET model parameters presented in this paper were submitted to the ITU-R meeting in 2006, and adapted for ITU-R report and recommendation P.833.

Key words : RET Model, RET Model Parameters, Phase Function, Vegetation Attenuation

I. 서 론

현재 수풀 감쇠 예측 모델과 관련하여 ITU-R에서는 2004년 ITU-R 회의에서 영국이 제안한 RET

(Radiative Energy Transfer) 모델과 모델 파라미터를 채택하여 권고하고 있다. RET 모델은 수풀을 통계적으로 균일한 랜덤 매질로 모델링하여, 산란 특성을 단위 체적당 흡수 단면적 σ_A 와 단위 체적당 산란

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

*정보통신부 전파연구소(Research Laboratory, Ministry of Informaion and Comunication)

· 논문 번호 : 20070110-007

· 수정완료일자 : 2007년 2월 13일

단면적 σ_s 및 매질의 산란 함수 $p(\hat{s}, \hat{s}')$ 로 나타내고 있으며, 기본 수식은 다음 식 (1)과 같다^[3].

$$\begin{aligned} & \hat{s} \cdot \nabla I(\hat{r}, \hat{s}) + (\sigma_A + \sigma_S)I(\hat{r}, \hat{s}) \\ &= \frac{\sigma_S}{4\pi} \int p(\hat{s}, \hat{s}')I(\hat{r}, \hat{s}')d\Omega \end{aligned} \quad (1)$$

위 식 (1)의 해 I 는 specific intensive로서 관측점의 위치 벡터 \hat{r} , source의 위치 벡터 \hat{s}' , 산란 방향 벡터 \hat{s} 로 표현된다. I 는 coherent 성분을 나타내는 I_{co} , 전방 산란 성분(forward lobe)과 등방성 배경 산란(background scattering) 성분을 나타내는 I_1 과 I_2 성분의 합으로 나타낼 수 있으며, 각 성분의 표현식은 식 (2)와 같다. 식 (2)의 표현식은 본 연구에 앞서 기존 ITU-R에서 권고하고 있는 수식의 오류를 발견하여 수정하고, 2005년 ITU-R 회의에서 기고서로 제출하여 개정 권고서로 채택된 바 있으며^[4], 식 (2)에 대한 파라미터 설명과 유도 과정은 논문 [5]에 자세히 설명되어 있다.

$$\begin{aligned} I_{co} &= e^{-\tau} \\ I_1 &= \frac{4\gamma_R^2}{4} \{ [e^{-\hat{\tau}} - e^{-\tau}] \overline{q_m} \\ &+ e^{-\tau} \sum_{m=1}^M \frac{1}{m!} (aW\tau)^m [\overline{q_m} - \overline{q_M}] \} \\ I_2 &= \frac{4\gamma_R^2}{2} \left\{ -e^{-\hat{\tau}} \frac{1}{P_N} \right. \\ &+ \left. \sum_{k=\frac{N+1}{2}}^N \left[A_k e^{-\frac{\hat{\tau}}{s_k}} \frac{1}{1 - \frac{\mu_N}{s_k}} \right] \right\} \end{aligned} \quad (2)$$

위 식에서 수풀의 깊이를 z 라 할 때,

$$\begin{aligned} \tau &= (\sigma_A + \sigma_S)z = \sigma_{\tau,z} z \\ \hat{\tau} &= (1-aW)\tau \\ \overline{q_m} &= \frac{4}{\Delta\gamma_R^2 + m\beta^2}, \quad (m=1, 2, 3, \dots, M) \\ \mu_n &= -\cos\left(\frac{n\pi}{N}\right), \quad (n=1, 2, 3, \dots, N) \\ P_n &= \sin^2\left(\frac{\pi}{2N}\right), \quad \text{for } n=0, N \\ P_n &= \sin\left(\frac{\pi}{N}\right)\sin\left(\frac{n\pi}{N}\right), \\ &\text{for } n=1, 2, 3, \dots, N-1 \end{aligned} \quad (3)$$

이며, A_k 와 s_k 는 식 (1)의 적분을 선형화 시켜 해를

표 1. RET 모델 입력 파라미터

Table 1. Input parameters for the RET model.

α	전방 산란 전력과 전체 산란 전력의 비
β	위상 함수(phase function)의 빔 폭
σ_{τ}	흡수 및 산란 단면적의 합
W	Albedo
$\Delta\gamma_R$	수신 안테나 빔 폭
d	수풀의 깊이 [m]

구할 때 얻어지는 계수이다^[5].

따라서 식 (2)로 표현된 RET 모델을 수풀 손실 예측에 이용하기 위해서는 표 1과 같은 6개의 파라미터에 대한 값이 주어져야 한다.

처음 4개의 파라미터는 산란 매체에 의한 특성을 나타내는 것으로서 측정값으로부터 도출하여야 하는 파라미터이고, 나머지 2개의 파라미터는 수신 측정 시스템과 수풀의 깊이에 의해 정해지는 값이다.

산란 매체의 특성을 나타내는 처음 4개의 입력 파라미터를 도출하는 방법으로는 측정을 통해 얻은 거리에 따른 수풀 손실 곡선과 RET 모델의 피팅을 통해 도출하는 방법과 수풀 손실 및 위상 함수 측정을 통해 도출하는 방법이 있다. 첫 번째 방법을 통해 RET 모델 파라미터를 도출하는 경우, 피팅이 상당히 어려우며 측정 결과로 얻은 수풀 손실 곡선에 따라 유일한 피팅 결과가 도출되지 않는 경우가 있고, 도출된 파라미터의 물리적 의미도 결여되어 있다. 기존의 ITU-R P.833에 주어진 RET 모델 파라미터들은 첫 번째 방법에 의해 구해진 것이다^[3].

따라서 본 논문에서는 위상 함수 측정을 통해 보다 정확하고 물리적인 타당성을 갖는 RET 모델 파라미터 도출 방법을 연구하기 위하여 국내 수풀 및 가로 환경에 많이 분포하는 소나무(pine tree), 히말라야시다(himalaya cedar), 플라타너스나무(plane tree), 메타나무(dawn-redwood tree), 은행나무(ginkgo tree), 벚나무(cherry tree), 중국단풍(trident maple tree) 등의 수풀에 대하여 12.5 GHz 대역에서 위상 함수와 거리에 따른 경로 손실 특성 측정을 수행하였으며, ITU-R P.833에서 제시하고 있는 RET 모델 파라미터에 대한 모델링 연구를 수행하였다.

II. 위상 함수

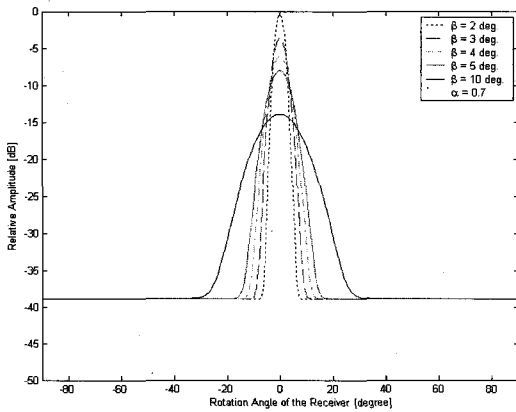
앞서 언급하였듯이 RET 입력 파라미터 중 α , β 는 일반적으로 위상 함수(phase function)로 알려진 산란 함수(scatter function)의 측정을 통해서도 얻을 수 있다. 위상 함수는 수풀에 의한 산란 특성을 나타내며 다음 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$p(\theta) = \alpha f(\theta) + (1 - \alpha) \quad (4)$$

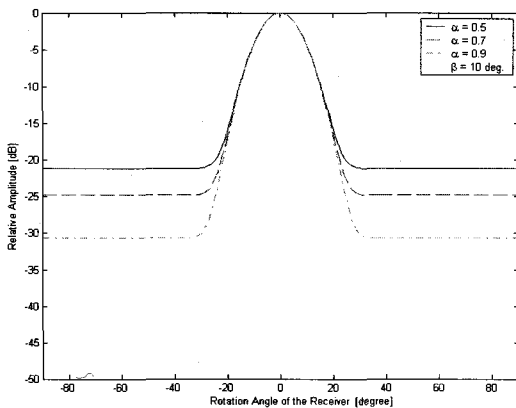
여기서 $f(\theta)$ 는 위상 함수의 전방 산란 패턴을 나타내는 함수로 다음과 같이 주어진다.

$$f(\theta) = \left(\frac{2}{\beta}\right)^2 e^{-(\theta/\beta)^2} \quad (5)$$

위 식에서 α 는 전체 산란 전력에 대한 전방 산란



(a) β 의 변화에 따른 위상 함수
(a) Variation of phase function for different values of β



(b) α 의 변화에 따른 위상 함수
(b) Variation of phase function for different values of α

그림 1. α , β 의 변화에 따른 위상 함수
Fig. 1. Variation of phase function for different values of α and β .

전력의 비를 나타내고, β 는 위상 함수의 빔 폭을 나타낸다. 그림 1은 α , β 에 따른 위상 함수 식 (4)의 변화를 보인 것이다. 세로축은 최대값이 1(또는 0 dB)이 되도록 정규화한 상대 수신 전력이며, 가로축은 산란 방향, 즉 수신 안테나의 회전 각도를 나타낸 것이다.

III. 위상 함수 측정 및 결과

3-1 측정 시스템 및 방법

위상 함수 측정을 위해서는 수풀의 폭이 예상되는 위상 함수의 빔 폭 β 를 포함할 수 있을 정도로 넓고, α 를 도출하기 위하여 전체 산란 성분의 후방 산란 성분도 포함할 수 있을 정도의 수풀 거리가 유지되어야 한다. 따라서 측정 대상 수종인 소나무, 히말라야시다, 플라타너스나무, 매타나무, 은행나무, 빛나무, 중국단풍 등 7개의 수종에 대하여 측정 조건에 맞는 군락지를 선정하였으며, 실제 측정 장소는 그림 2와 같다.

또한 수풀에 의한 전파의 산란 패턴을 정확히 측정하기 위해서는 송신 안테나를 수풀 내에 전파를 충분히 조사할 수 있을 만큼 넓은 빔 폭을 가지는 안테나를 사용하고, 좁은 안테나 빔 폭을 가지는 수신 안테나를 이용하여 수신 안테나의 양각(azimuth angle)에 따른 수신 전력을 측정하여야 한다. 따라서 이동통신 주파수 대역에서는 얻을 수 있는 빔 폭의 한계가 있기 때문에 측정에 사용한 수신 안테나는 좁은 안테나 빔 폭이 가능한 12.5 GHz에서 1.8도의 3



그림 2. 측정 장소(히말라야시다)
Fig. 2. Measurement site(Hymalaya Cedar).

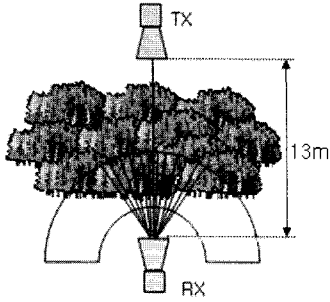


그림 3. 위상 함수 측정 예시도
Fig. 3. Measurement geometry for phase function.

dB 빔 폭을 갖는 접시 안테나를 사용하였으며, 송신 안테나는 측정 주파수 12.5 GHz에서 35도의 3 dB 빔 폭을 갖는 혼 안테나를 사용하였다. 측정 시 지면에 의한 반사 성분을 제거하기 위하여 송·수신 안테나를 높이 4 m 이상에 위치시켰으며, 안테나의 빔 폭이 수풀의 폭에 포함되도록 하였다.

측정 방법으로는 RET 모델에서 수풀은 통계적으로 균일한 랜덤 매질로 모델링하였기 때문에 매질의 정밀한 산란 특성 측정을 위해 주사 방법(scanning technique)으로 알려진 방법을 이용하여^[6], 수신 안테나를 수평 방향으로 1도씩 회전시키면서 수신 전력을 기록하였다. 위상 함수 측정 예시도는 그림 3과 같다. 또한 위상 함수 측정과 병행하여 수행한 12.5 GHz 대역에 대한 경로 손실 측정은 송신 안테나와 동일한 혼 안테나를 수신 안테나로 사용하여 거리가 다른 여러 지점에서 측정을 수행하였다^[5].

3-2 측정 결과

그림 4는 12.5 GHz 대역에서 측정된 7개 수종에 대한 수풀 깊이 따른 감쇠 특성을 나타낸 것이며, 그림 5는 7개의 수종 중 플라타너스에 대한 위상 함수 측정 결과를 예시한 것이다.

IV. 위상 함수를 이용한 RET 모델링 및 결과 분석

측정된 위상 함수를 이용하여 4개의 RET 모델 파라미터 중 α, β 를 위상 함수 피팅을 통하여 먼저 도출하였다. 다음 그림 6은 7개의 수종에 대한 위상 함수 측정 데이터 및 피팅 결과 중에서 은행나무와 플

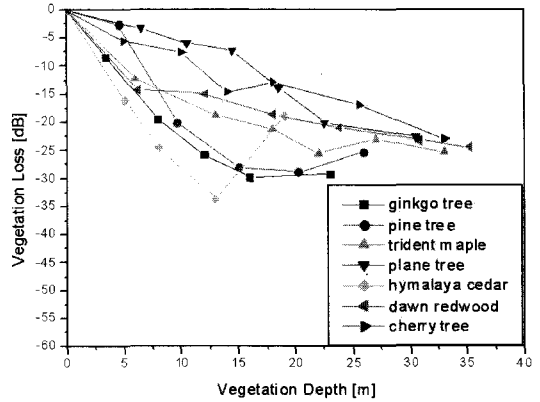


그림 4. 수풀 깊이에 따른 감쇠 특성(12.5 GHz)
Fig. 4. Measured attenuation as a function of vegetation depth(12.5 GHz).

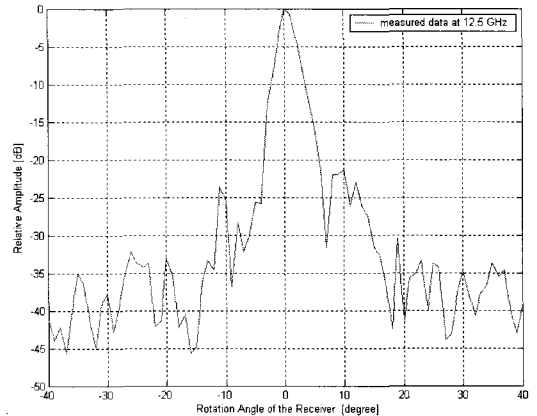
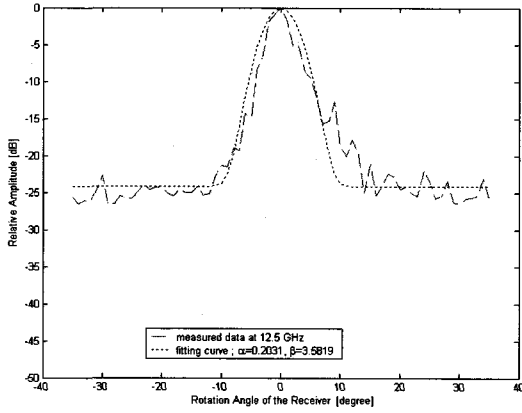


그림 5. 위상 함수 측정 결과(플라타너스)
Fig. 5. Measurement result of the phase function(plane tree).

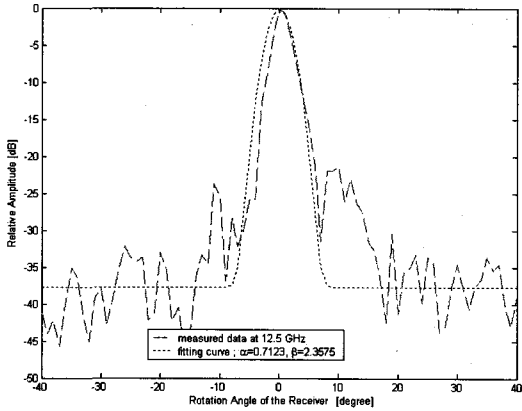
라타너스에 대한 예를 보인 것이다.

위상 함수 측정값으로부터 도출한 RET 모델 파라미터 α, β 값을 이용하면, 수풀의 산란 특성과 관련된 4개의 파라미터 중 나머지 2개의 파라미터 W, σ_r 는 수풀 깊이에 따른 경로 손실 측정 데이터와 RET 기반 모델을 이용하여 최소 자승 오차(least square error) 방법으로 피팅을 통해 도출할 수 있다^[5].

위상 함수와 경로 손실 측정 데이터를 이용하여 도출한 RET 모델 파라미터 $\alpha, \beta, W, \sigma_r$ 를 표 2에 정리하였으며, 은행나무와 플라타너스에 대한 경로 손실 측정 결과와 RET 모델의 피팅 결과를 그림 7에 나타내었다. 그림 7에서 새로측은 수풀에 의한 감쇠

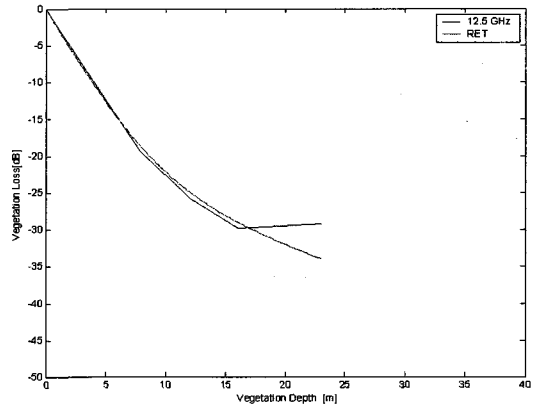


(a) 은행나무 ($\alpha=0.23, \beta=3.58^\circ$)
 (a) Ginkgo tree ($\alpha=0.23, \beta=3.58^\circ$)

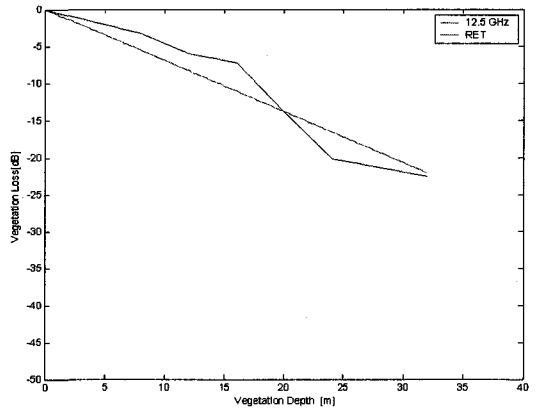


(b) 플라타너스 ($\alpha=0.71, \beta=4.25^\circ$)
 (b) Plane tree ($\alpha=0.71, \beta=4.25^\circ$)

그림 6. 정규화된 위상 함수 측정치 및 피팅 결과
 Fig. 6. Measurement data and the fitted result for the normalized phase function.



(a) 은행나무
 (a) Ginkgo tree



(b) 플라타너스
 (b) Plane tree

그림 7. 측정 데이터와 RET 모델의 피팅 결과
 Fig. 7. Fitted result of the RET model with the measurement data.

표 2. 도출된 RET 모델 파라미터
 Table 2. Fitted values of the RET model parameters.

수종 \ 파라미터	α	β	W	σ_r
플라타너스	0.71	2.36	0.25	0.17
중국단풍	0.25	4.25	0.94	0.47
은행나무	0.20	3.58	0.97	0.74
벚나무	0.16	3.39	0.9	0.18
소나무	0.23	4.37	0.98	0.5
메타나무	0.21	2.57	0.99	0.44
히말라야시다	0.27	3.54	0.98	0.9

를 나타내며, 가로축은 수풀의 깊이를 나타낸다.
 도출된 파라미터의 물리적인 타당성을 검증하기 위하여 7개의 측정 대상 수종의 잎의 크기를 측정 하였으며, 결과는 표 3과 같다.
 표 2와 표 3을 통해서 활엽수인 플라타너스, 중국 단풍, 은행나무, 벚나무의 경우 위상 함수 측정을 통해 도출한 α, β 와 각 수종별 잎의 크기를 비교해 볼 때 전체 산란 전력에 대한 전방 산란 전력을 의미하는 α 는 상대적으로 잎의 크기가 큰 수종에서 크게 나타났으며, 위상 함수의 빔 폭을 나타내는 β 는 상대적으로 잎의 크기가 큰 수종에서 작은 것을 확인할 수 있다. 이것은 잎의 크기가 클 경우, 잎에 의한

표 3. 수종별 잎의 크기

Table 3. Leaf size for seven different tree-species.

수종	잎 크기(cm×cm)
플라타너스	18×15
중국단풍	7×8.5
은행나무	10×5.5
벚나무	5×8
소나무	0.1×13
메타나무	0.3×4
히말라야시다	0.1×4

전방 산란 특성이 크게 나타는 것으로 생각할 수 있다. 그러나 침엽수인 소나무, 히말라야시다, 메타나무의 경우는 잎의 크기(실제 잎의 길이)에 따라 큰 차이를 보이지 않는다. 침엽수의 경우, 전반적으로 α 는 비슷한 값을 가지지만 β 값은 히말라야 시다와 소나무의 경우 상대적으로 메타나무보다 큰 것을 알 수 있다. 이는 실제 수종의 잎의 밀도가 메타나무보다 히말라야 시다와 소나무가 크기 때문인 것으로 판단된다.

앞에서 언급한 바와 같이 기존의 ITU-R 방식인 위상 함수 측정 결과를 이용하지 않고 수풀 손실 측정 결과만을 이용하여 피팅을 통해 α , β 와 W , σ_r 값을 모두 구할 경우, 도출한 파라미터 값의 유일성 및 물리적 의미 등에서 단점이 있지만^[5], 본 연구에서 제안한 위상 함수의 측정 결과로부터 α , β 값을 먼저 도출하고, 이를 이용하여 경로 손실 측정 데이터와 RET 모델의 피팅을 통해 W , σ_r 의 값을 도출한 경우에는 파라미터 α , β 값이 나뭇잎의 크기와 밀도에 따른 경향성을 가지며, W , σ_r 값은 피팅을 통해 유일한 값이 도출됨을 알 수 있다.

따라서 보다 정확하고 물리적으로 타당한 RET 모델 파라미터 도출을 위해서는 위상 함수 측정이 선행되어야 함을 알 수 있다.

V. 결 론

ITU-R에서 제시하고 있는 RET 모델을 이용하여 수풀에 의한 손실을 예측을 하기 위해서는 6개의 입력 파라미터가 필요하며, 이중에서 수풀의 산란 특성과 관련된 4개의 파라미터에 대한 수종별 데이터

가 필요하다. 기존의 ITU-R 권고서에서는 제한된 수종에 대한 경로 손실 측정 데이터만을 사용하여 도출한 RET 모델 파라미터 값을 제시하고 있다.

그러나 ITU-R에서 제시하고 있는 위상 함수 측정을 이용하지 않고 경로 손실 측정을 통해서 파라미터를 도출하는 방법에 따라 RET 모델 파라미터를 도출할 경우 피팅이 어려우며, 피팅 결과로 도출되는 파라미터 값의 유일성 및 물리적 타당성 등에 있어서 문제가 있다. 따라서 본 논문에서는 보다 정확하고 물리적으로 타당한 RET 모델링 방법 연구를 위해 12.5 GHz 대역에서 소나무, 히말라야시다, 플라타너스나무, 메타나무, 은행나무, 벚나무, 중국단풍 등 7개의 수종에 대하여 위상 함수와 경로 손실 측정을 동시에 수행하고, 측정 결과를 이용하여 RET 모델 파라미터를 도출하였다.

본 논문의 방법을 사용하면 기존의 방법에 비해 보다 정확하고 용이하게 RET 모델 파라미터 도출할 수 있고, 본문에서 분석한 바와 같이 도출된 파라미터가 물리적으로 타당함을 확인하였다. 기존의 권고서에 주어진 것과 같이 수종 및 주파수에 따른 물리적 타당성이 없다면, 앞으로 다양한 수종과 주파수 대역에 대해 주어진 RET 모델을 적용시키고자 할 때(유사 수종 매칭 및 주파수 대역 보간 등의 방법으로) 수풀 손실 예측 정확도 및 물리적 타당성에 있어서 문제가 있고, 또한 앞으로 예측 모델의 개선 연구(잎의 크기, 밀도 및 주파수 등에 따른 예측 모델의 단순화 및 일반화 연구)에 있어서 제약점이 있을 수 밖에 없다. 따라서 본 논문에서 보인 것과 같이 물리적으로 타당하며, 유일한 값을 갖는 RET 모델 파라미터의 도출을 위해서는 위상 함수 측정이 경로 손실 측정과 동시에 수반되어야 하는 것으로 결론지을 수 있다.

본 논문의 주요 연구 결과인 위상 함수 측정을 통한 RET 모델 파라미터 도출 방법 및 도출된 파라미터, 측정 데이터 및 데이터뱅크용 데이터 양식은 2006년 ITU-R 회의에 기고서로 제출하여 P.833-5 관련 별도의 보고서 및 P.833-5의 개정 권고서로 채택되었다. 또한 위상 함수 측정과 관련하여 기고한 데이터뱅크용 데이터 양식도 ITU-R 표준 양식으로 채택되었고, 측정 데이터도 데이터뱅크에 채택되었다.

RET 모델은 상당히 복잡한 모델이다. 사용이 용

이하고 보다 단순화된 예측 모델 개발을 위해서는 앞으로 보다 광범위한 측정을 통한 추가의 연구가 필요하다.

참고 문헌

[1] ITU R WP document, Republic of Korea, no. 3J/163, Oct. 2006.
 [2] ITU R WP document, Republic of Korea, no. 3J/TEMP/117-E, Oct. 2006.
 [3] ITU-R "Attenuation in vegetation", *ITU-R Rec.*,

p. 833, 2004.
 [4] ITU R WP document, Republic of Korea, no. 3J/102, Oct. 2005.
 [5] 한일탁, 정명원, 백정기, "1~6 GHz 대역 수풀 손실 특성 추정 및 모델링", 한국전자과학회논문지, 18(1), pp. 96-104, 2007년 1월.
 [6] N. C. Rogers, A. Seville, "A generic model of 1-60 GHz radio propagation through vegetation", *Radio Agency*, UK, May 2002.

한 일 탁



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

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

배 석 희



1989년 2월: 연세대학교 천문기상학 (이학사)
 1991년 2월: 연세대학교 천문대기학 (이학석사)
 2000년 4월: 연세대학교 천문우주학 박사수료
 1991년~2006년 5월: 정보통신부 전파연구소 공업연구사

2006년~현재: 정보통신부 전파연구소 공업연구관
 1999년~현재: 한국 ITU-R 연구위원회 SG3(전파전파) 분과 의장
 [주 관심분야] Radio Propagation & Modeling, Spectrum Management & Computer-aided techniques

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