

실효유전율을 이용한 강우감쇠 예측 모델에 관한 연구

A Study on the Rain Attenuation Prediction Model Using Effective Permittivity

김혁제 · 조삼모

Hyuk-Je Kim · Sam-Mo Cho

요 약

빗방울이 랜덤하게 분포한 대기를 하나의 실효유전율을 가진 단일 매질로 가정하고 그 매질 내에서 전파가 진행시 감쇠량을 계산하였다. 실효유전율은 빗방울의 유전율과 빗방울이 대기 중에 차지하는 체적 등의 함수로 표현되는데, 주파수와 온도에 따라 변하는 빗방울의 유전율을 계산하고 Marshall-Palmer의 빗방울 크기분포를 이용하여 대기 중 빗방울이 차지하는 체적을 계산하였다. 빗방울이 산재한 대기를 단일 매질로 가정하고 실효유전율을 이용하여 강우에 의한 강우감쇠량을 예측한 본 모델과 ITU가 권고하는 강우에 의한 전파감쇠모델과 비교하였는데 두 모델의 결과값이 비교적 일치하며 50 GHz 이하에서는 실효유전율 모델이 낮게, 50 GHz 이상의 주파수 대역에서는 높게 강우감쇠량을 평가하고 있다.

Abstract

We calculated the wave attenuation due to rain using the effective permittivity of the air with raindrops. The effective permittivity depends on the complex permittivity of rain drop and the fractional volume occupied by the raindrops. We calculate the complex permittivity of rain drop and the raindrops' volume using Marshall-Palmer Rain drop size distribution. The rain attenuation calculated by effective permittivity is compared with the results of ITU rain attenuation model, and the two rain attenuation models have a very close agreement. The effective permittivity model underestimates the rain attenuation under 50 GHz, and overestimate at the frequencies under 50 GHz compared with the ITU model.

I. 서 론

정보화 사회로의 급속한 발전과 더불어 무선통신에 대한 수요가 급격히 증가함에 따라 IMT-2000, 무선 CATV, 무선가입자망(WLL) 등 새로운 개념의 무선통신 시스템이 개발되고 있으며 차량레이

더, 무선카드, 무선산업자동화시스템, 도로교통 종합정보시스템 등 전파이용 분야도 날로 확대되고 있다.

또한 무선통신망의 셀개념도 매크로셀에서 마이크로셀, 피코셀 방식이 시도되고 있으며, 사용주파수 대역도 기존의 UHF 대역에서 준마이크로파(1~3 GHz), 마이크로파 대역(3~30 GHz), 그리

고 밀리미터파대역(30~300 GHz)으로 확장되고 있다.

한편, 마이크로파 및 밀리미터파 대역 무선통신 시스템을 개발하고 이용하기 위해서는 대기 중의 입자(강우, 강설, 수증기, 먼지 등)와 전파와의 상호작용에 의한 전파감쇠 및 그로 인한 통신시스템의 회선품질의 저하에 대처해야 한다. 예를 들어, 산소분자에 의한 최대흡수는 60 GHz 부근으로 1 km당 전파손실이 10 dB 이상이 되며 수증기에 의해서는 200 GHz 부근에서 최대흡수가 발생하며 1 km당 30 dB의 손실값이 발생한다.

그러나 대기 중 산소 및 수증기에 의한 마이크로파 및 밀리미터파 대역의 전파손실은 일부대역에 한정된 특성이며 실제로 전파전파에 가장 큰 영향을 미치는 것은 강우에 의한 전파감쇠이다. 강우감쇠가 증가하여 회선품질이 정해진 규격을 벗어나면 시스템은 불가동 상태가 되며 이를 억제하기 위해 각 중계거리는 제약을 받게된다. 즉 마이크로파 및 밀리미터파 대역 무선망을 설계하려면 강우에 의한 전파감쇠량을 예측하는 일이 선행되어야 한다.

강우에 의한 전파감쇠에 대한 이론적 실험적 연구는 1940년대부터 시작되어 현재까지 활발히 이루어지고 있다.^[1] 현재 ITU에서 권고하는 강우감쇠 모델 등은 강우입자에 의한 산란(single scattering) 파의 합으로 나타내고 있다. 강우입자에 의한 전파의 산란은 단일산란(single scattering)과 전방으로의 다중산란(multiple scattering) 및 후방으로의 다중산란 등으로 나눌 수 있는데 현재 ITU 모델에서는 후방으로의 다중산란의 영향은 고려하지 않고 있다. 하나의 빗방울에 의한 전파의 산란 영향을 고려한 후 강우율(mm/hr)에 따른 강우입자 크기 분포에 따라 전체 강우에 의한 전파의 산란 및 감쇠 영향을 계산한다. 따라서 강우입자 크기의 분포모델에 따라 강우감쇠량이 다르게 계산되고 있다. 현재 많이 이용되고 있는 강우입자 크기 분포모델은 L-P분포^[2] 및 M-P분포^[3] 등이다. 빗방울에 의한 전파의 산란을 표시하는 수식이 복잡하고 또한 빗방울 크기 분포를 나타내는 함수도 복잡하여,

현재 쓰이고 있는 강우에 의한 전파감쇠 모델들은 매우 복잡한 수식으로 표현된다. ITU에서 권고하는 강우에 의한 전파감쇠모델은 매우 간단하게 보이지만 실제로는 복잡한 계산절차를 수행한 결과를, 사용자가 쉽게 이용할 수 있도록 주파수별로 표로 구성한 것이다.

마이크로파 및 밀리미터파 무선 시스템의 중계거리는 UHF 대역보다 작으며 일단 비가 오는 경우 시스템의 중계거리 전체에 비가 온다고 가정할 수 있다. 대기 중에 유전율이 다른 강우입자들이 존재하는 경우, 공기의 유전율, 강우의 유전율 및 강우입자가 공기 중에 퍼져있는 밀도 등을 고려하여 실효유전율(effective permittivity)을 가진 단일 매질로 생각할 수 있다.

본 논문에서는 강우입자가 존재하는 공기매질을 실효유전율을 가진 단일매질로 가정하고 그 매질 내에서 전파가 진행한다고 가정하여 강우에 의한 전파감쇠량을 계산하였다.

본 논문에서 제시한 모델은 기존의 강우감쇠 계산 모델에 비해 매우 간단한 수식이며 또한 근사적인 분석 결과이지만 강우에 의한 전파감쇠 영향을 물리적 안목으로 쉽게 접근하고 주파수와 강우율의 함수로써 강우에 의한 전파감쇠량을 명확하게 이해할 수 있다.

본 논문의 2장에서는 임의의 유전체 속에 구모양의 산란체가 분포하는 경우 실효유전율을 구하는 방법을 서술하고 3장에서는 빗방울의 유전율 및 강우율에 따라서 빗방울이 공기 중에 차지하는 체적에 관하여 설명한다. 이어서 4장에서는 강우에 의한 전파감쇠량을 간단한 수식으로 정리하고 ITU 모델과 비교하여 보았다.

II. 실효유전율(Effective Permittivity)

2-1 서로 다른 유전율을 가진 2종류의 물질로 구성된 매질의 실효유전율

그림 1과 같이 유전율 ϵ 인 매질에 구모양의 유

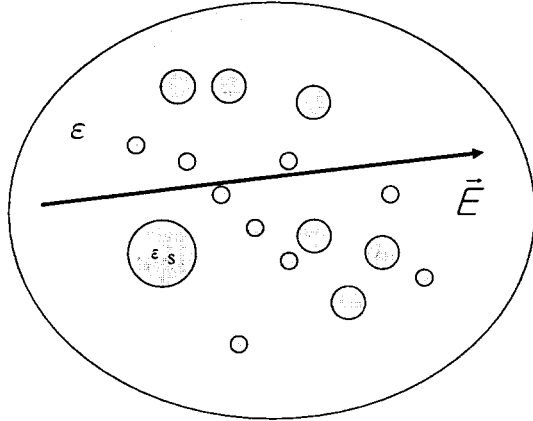


그림 1. 균일한 유전율(ϵ)의 매질속에 랜덤하게 분포된 구모양(sphere)의 산란체(scatterer)
 Fig. 1. Randomly distributed sphere scatterer in the matter of permittivity ϵ .

전율 ϵ_s 인 물질이 섞여있는 경우를 생각해 보자. 이 종의 물질로 구성된 매질의 실효유전율은 다음 식으로 정의된다.

$$\vec{D} = \epsilon_{eff} \vec{E} \quad (1)$$

여기서 \vec{E} 는 매질내의 전기장(electric field)이고 \vec{D} 는 변위장(displacement field)이다. 다시 \vec{D} 는 물질 내의 편극(polarization) \vec{P} 로 나타낼 수 있다.

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} + \vec{P} \quad (2)$$

여기서 ϵ 은 그림 1에서와 같이 기본 매질의 유전율이다. 또한 편극은 기본물질에 산재하는 침투물질의 유전체적 특성, 편극도(polarizability), 차지하는 체적 등에 의해 결정되는데 단위 체적당 편극은 식 (3)과 같다.

$$\vec{P} = n_o \alpha \vec{E}_c \quad (3)$$

여기서 n_o 는 단위체적당 침투한 산란체의 개수, α 는 편극도를 나타내며 \vec{E}_c 는 기본 전기장과 편극에 의한 전계를 합한 양으로 다음 식으로 표현된다.^[5]

$$\vec{E}_c = \vec{E} + \frac{1}{3\epsilon} \vec{P} \quad (4)$$

편극도 α 는 단위체적당 침투산란체 내에서 발생되는 이극(dipole) 모멘트로서 침투산란체의 모양, 크기, 유전율 및 방향 등의 함수이다. 침투한 산란체의 유전율이 ϵ_s 이고 구형이며 산란체 하나의 체적이 V_0 인 경우 편극도 α 는

$$\alpha = v_0 (\epsilon_s - \epsilon) \frac{3\epsilon}{\epsilon_s + 2\epsilon} \quad (5)$$

로 간단히 쓸 수 있다.^[4] 그러나 침투산란체들의 크기가 인가된 전기장의 파장과 비슷해짐에 따라 각 침투산란체들은 모든 방향으로 재방사(reradiation)를 일으키며 공진주파수(f_r)에서 재방사량이 최대가 된다. 예를 들어 완전 도체이며 반지름이 a 인 구형산란체인 경우 공진주파수는 $f_r = \frac{3 \times 10^8 \times \sqrt{3}}{4\pi a}$ 로 표현된다.^[7] 따라서 침투산란체들의 크기와 비교할 만큼 파장이 짧은 높은 주파수대에서 편극도 α 는 다음과 같이 쓸 수 있다.^[7]

$$\alpha_h = \frac{\alpha}{1 + i(\frac{f}{f_r})} \quad (6)$$

여기서 α_h 는 높은 주파수대에서 편극도, f_r 는 침투산란체에서의 재방사가 최대가 되는 주파수를 나타낸다.

식 (3), (4), (6)으로부터 \vec{P} 를 \vec{E} 에 대해 풀고 식 (2)와 식 (1)로부터 실효유전율을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\epsilon_{eff} = \epsilon + \frac{3VF(\epsilon_s - \epsilon)\epsilon / (\epsilon_s + 2\epsilon)}{1 - VF(\epsilon_s - \epsilon) / (\epsilon_s + 2\epsilon)} \quad (7)$$

여기서, $F = \frac{1}{1 + i(\frac{f}{f_r})}$ 이고, $V = n_0 v_0$ 로서 기본

물질 속에 산란체들이 차지하는 체적이다.

2-2 빗방울의 유전율 및 체적

빗방울이 산재된 대기를 하나의 매질로 생각하여 식 (6)과 같이 실효유전율을 구하기 위해 빗방울의 유전율 즉 그림 1에서 ϵ_s 를 구해본다.

빗방울의 유전율 ϵ_s 을 다음과 같이 복소유전율로 정의한다.

$$\epsilon_s = \epsilon_0 \epsilon_w = \epsilon_0 (\epsilon' - i\epsilon'') \quad (8)$$

여기서 ϵ_0 는 자유공간의 유전율이다. 빗방울은 물로서 물의 유전율은 온도 및 주파수에 관한 함수로 표시된다. P.S.Ray는 기존의 물의 유전율을 계산하는 수식을 모아 다음과 같이 정리하였는데 파장 (λ)과 온도(t)의 함수로 표현된다.^[6]

$$\epsilon' = \epsilon_\infty + \frac{(\epsilon_{st} - \epsilon_\infty)[1 + (\lambda_s/\lambda)^{1-\alpha} \sin(\alpha\pi/2)]}{1 + 2(\lambda_s/\lambda)^{1-\alpha} \sin(\alpha\pi/2) + (\lambda_s/\lambda)^{2(1-\alpha)}} \quad (9)$$

$$\epsilon'' = \frac{(\epsilon_{st} - \epsilon_\infty)(\lambda_s/\lambda)^{1-\alpha} \cos(\alpha\pi/2)}{1 + 2(\lambda_s/\lambda)^{1-\alpha} \sin(\alpha\pi/2) + (\lambda_s/\lambda)^{2(1-\alpha)}} + \frac{\sigma\lambda}{18.8496 \times 10^{10}} \quad (10)$$

$$\epsilon_{st} = 78.54[1.0 - 4.579 \times 10^{-3}(t - 25.0) + 1.19 \times 10^{-5} \times (t - 25.0)^2 - 2.8 \times 10^{-8}(t - 25.0)^3] \quad (11)$$

$$\epsilon_\infty = 5.27137 + 0.0216474t - 0.00131198t^2 \quad (12)$$

$$\alpha = -16.8129 / (t + 273) + 0.0609265 \quad (13)$$

$$\lambda_s = 0.00033836 \exp[2513.98 / (t + 273)] \quad (14)$$

$$\sigma = 12.5664 \times 10^8 \quad (15)$$

식 (9)에서 식 (15)에 의해 20℃에서 주파수별로 물의 복소유전율을 표 1과 같이 계산하였다.

강우율에 따른 빗방울의 크기분포는 Laws-Parsons 분포, Marshall-Palmer 분포, Joss 분포, Ihara 등이 제안한 일본지역 분포 등 다양한 모델이 있다^{[1]-[3]}.

Laws-Parsons 분포 및 Marshall-Palmer 분포는 지금까지 가장 널리 쓰이고 있으며 특히 Laws-Parsons 분포는 ITU-R의 강우모델에서 채택하고 있다. Laws-Parsons 분포는 표로 작성되었으며, Marshall과 Palmer는 그들의 측정치와 Laws-Parsons의 측정치로부터 다음과 같은 지수형 분포 함수를 제안하였다.^[3] 본 논문에서는 수식으로 표현된 Marshall과 Palmer 강우크기 분포함수를 채택

표 1. 20℃에서 물의 복소유전율

Table 1. Complex permittivity of water at 20℃.

주파수(GHz)	$\epsilon_s = \epsilon_0 \epsilon_w = \epsilon_0 (\epsilon' - i\epsilon'')$	
	ϵ'	ϵ''
1	80.06109	4.740592
2	79.22818	9.055127
4	76.13568	17.15869
8	66.10063	29.29196
10	60.29378	33.06845
20	36.01819	36.78099
30	23.03551	31.79209
40	16.44642	26.63174
50	12.83803	22.53621
70	9.328874	16.96288
100	7.297342	12.23387

하였다.

$$n(a)da = N_0 e^{-\Lambda a} da \quad (16)$$

$$N_0 = 1.6 \times 10^4 \text{ (m}^{-3} \cdot \text{mm}^{-1}\text{)}$$

$$\Lambda = 8.2R^{-0.21} \text{ (mm}^{-1}\text{)}$$

여기서 a 는 빗방울의 반지름(mm), R 은 강우율(mm/hr)이다. $n(a)da$ 는 빗방울 직경이 a (mm)와 $a+da$ (mm) 사이에 분포하는 빗방울의 단위체적당 개수(m^{-3})를 나타낸다. 빗방울 크기분포로부터 빗방울이 대기 중에 차지하고 있는 체적을 구할 수 있다.

실제 빗방울의 모양은 구형이 아니고 아랫부분이 편평한 편구형이다. 그러나 본 모델에서는 빗방울은 반지름 a 인 완전구형이라 가정한다. 반지름이 a

인 빗방울의 체적은 $V_0 = \frac{4}{3} \pi a^3$ 으로 나타낼 수 있

고 빗방울의 크기는 식 (16)과 같은 분포를 가지므로 전체 빗방울이 차지하는 체적은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$V = \int n(a)v_0 da \quad (17)$$

실측 및 이론적 규명에 의해 빗방울의 크기는 반지름 4 mm를 초과하지 못하는 것으로 알려져 있다.^[1] 반지름이 4 mm 이상이 되는 빗방울들은 그 모양을 유지하지 못하고 2~3개의 작은 빗방울로 쪼개지게 된다. 그러므로 식 (17)의 적분에서 하한은 0으로 상한은 4 mm로 선택하여 빗방울이 공기 중에 차지하는 체적을 구할 수 있다.

III. 강우에 의한 전파손실량 계산

빗방울의 유전율 및 차지하는 체적 등을 구하여 빗방울이 산재한 대기의 실효유전율을 계산하고 그 매질 내에서의 전파감쇠량을 유도한다.

그림 1에서 ϵ 인 매질을 ϵ_0 인 자유공간으로, $\epsilon_s = \epsilon_0$

$\epsilon_s = \epsilon_0(\epsilon' - i\epsilon'')$ 인 구모양의 산란체들을 빗방울로 가정하고 식 (7)을 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\epsilon_{eff} = \epsilon_0(\epsilon_r - i\epsilon_i) = \epsilon_0 \left[1 + \frac{-3VF}{\left(\frac{\epsilon_w + 2}{\epsilon_w - 1} - VF\right)} \right] \quad (18)$$

여기서, 빗방울의 유전율 ϵ_s 는 식 (9) 및 식 (10)에 의해 온도 및 주파수별로 계산할 수 있고 빗방울이 차지하는 체적 V 는 빗방울이 구형이라는 가정하에 빗방울 크기분포 함수로부터 식 (17)로 계산한다.

한편 유전체 내에서의 평면파(plane wave)의 전파는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \gamma &= \alpha + j\beta = j\omega\sqrt{\mu\epsilon} = j\omega\sqrt{\mu_0\epsilon_{eff}} \\ &= j\omega\sqrt{\mu_0\epsilon_0}\sqrt{\epsilon_r - j\epsilon_i} \end{aligned} \quad (19)$$

여기서 γ 는 전파상수, ω 는 각주파수(angle frequency), μ_0 는 자유공간의 투자율(permeability)이다. 식 (19)의 근호를 풀어쓰고 감쇠상수 α 에 대해서 쓰면 단위길이당 손실값을 알 수 있다.

$$\alpha = \frac{\epsilon_i}{\sqrt{\epsilon_r}} \cdot \pi \cdot \lambda \text{ (neper / m)} \quad (20)$$

1 neper는 8.686 dB이므로 실효유전율이 ϵ_{eff} 인 단일 매질에서의 단위길이당 전파손실은 다음 식으로 표현된다.

$$A = 8.686 \cdot \frac{\epsilon_i}{\sqrt{\epsilon_r}} \cdot \pi \cdot \lambda \cdot 10^3 \text{ (dB / km)} \quad (21)$$

빗방울 크기분포로부터 평균 빗방울 크기를 알아내고 $f, \approx \frac{3 \times 10^8 \times \sqrt{3}}{4\pi a}$ 의 관계를 이용하여 완전 구형 빗방울들이 최대로 재방사를 일으키는 공진주

표 2. 강우율에 따른 평균 빗방울 크기와 f ,

Table 2. Average raindrop size and f , at each rain rate.

강우율 (mm/hr)	평균빗방울반지름 (mm)	f , (GHz)
0.25	0.9915	40.99
1.25	1.3615	56.297
2.5	1.5545	64.278
5	1.7665	73.044
12.5	2.0765	85.862
25	2.342	96.840
50	2.38	98.412
100	2.7525	113.814
150	2.9575	122.29

파수를 계산할 수 있는데 표 2에 그 결과를 정리하였다.

표 2 및 식 (17)을 이용하여 F 와 V 를 계산하고, 20°C에서 빗방울의 유전율을 계산한 결과인 표 1을 사용하여 식 (18)에서 실효유전율을 알아내고 식 (21)로 단위길이당 강우에 의한 전파손실량을 계산할 수 있다.

IV. 계산 결과 및 ITU 모델과의 비교

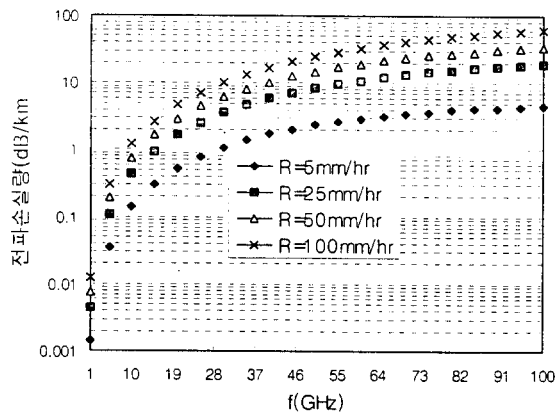


그림 2. 20°C에서 전파감쇠량(dB/km)

Fig. 2. Specific rain attenuation(dB/km) at 20°C.

그림 2는 1 GHz에서 100 GHz의 주파수 대역에서 강우율별로 단위길이당 강우에 의한 전파감쇠량을 계산한 결과이다.

그림 3, 4, 5, 6에서는 5, 25, 50, 100 mm/hr의 강우율에서 본 논문의 결과와 ITU-R에서 권고하는 강우감쇠모델의 결과값을 비교하였다.

강우율 5 mm/hr인 경우 식 (21)의 결과값은 ITU모델의 결과에 0.7 dB/km의 차이 이내에 일

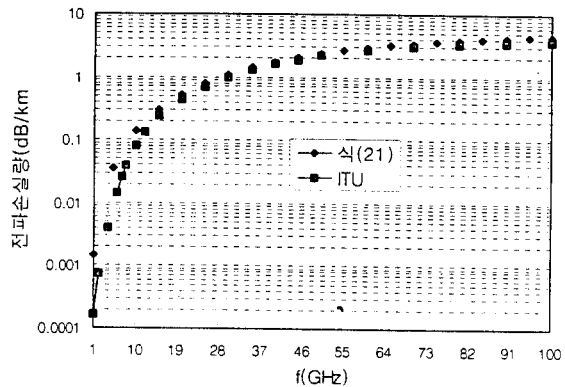


그림 3. 강우율 5 mm/hr에서 강우감쇠량 비교

Fig. 3. Rain attenuation calculation results at 5 mm/hr.

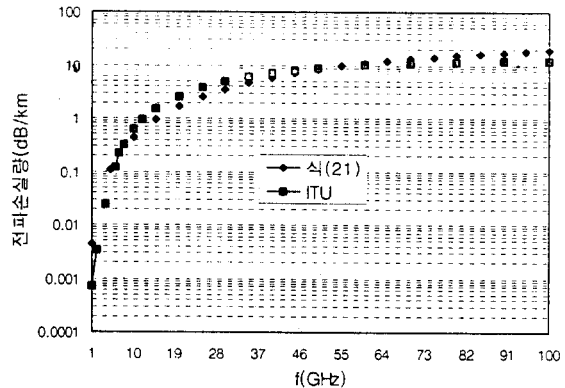


그림 4. 강우율 25 mm/hr에서 강우감쇠량 비교

Fig. 4. Rain attenuation calculation results at 25 mm/hr.

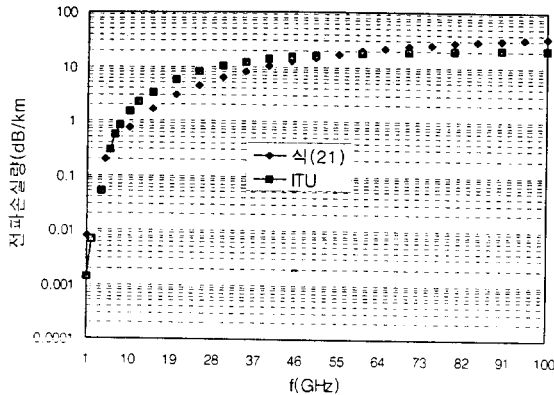


그림 5. 강우율 50 mm/hr에서 강우감쇠량 비교
 Fig. 5. Rain attenuation calculation results at 50 mm/hr.

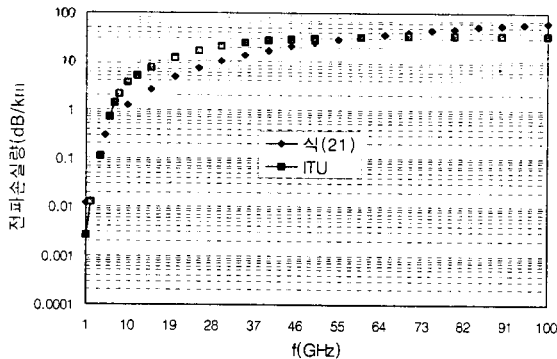


그림 6. 강우율 100 mm/hr에서 강우감쇠량 비교
 Fig. 6. Rain attenuation calculation results at 100 mm/hr.

치하고 있다. 강우율 25, 50, 100 mm/hr인 경우 50 GHz까지는 식 (21)의 결과가 ITU 모델에 비해 최고 5 dB/km 편차로 낮게, 50 GHz 이상 100 GHz까지는 최고 25 dB/km의 편차 이내로 높게 강우감쇠량을 평가하고 있다.

V. 결 론

UHF대역 및 그 이하의 주파수대역에 비해 마이크로파 및 밀리미터파 대역에서는 대기중 전파감쇠가 심하여 무선시스템의 중계거리가 상대적으로 짧다. 특히 강우에 의한 전파감쇠는 마이크로파 및 밀리미터파 대역에서 매우 심하여 무선회선설계시 가장 중요한 설계요소이다. 이에 강우에 의한 전파감쇠를 계산할 수 있는 모델을 제시하고 현재 가장 널리 쓰이고 있는 ITU 강우감쇠모델과 비교하였다. 기존의 모델은 빗방울 하나 하나에 대한 산란을 계산하여 전체 빗방울에 의한 전파감쇠를 계산하므로 그 수식이 매우 복잡하게 구성된다. 이와 반면에 본 모델은 빗방울이 산재하고 있는 대기공간을 실효유전율을 가진 하나의 매질로 생각하고 그 매질 내에서 전파가 진행된다고 가정하여 강우감쇠량을 계산토록 구성하였다. 따라서 그 수식이 기존의 모델보다 매우 간단하며 강우에 의한 전파감쇠를 물리적으로 쉽게 이해할 수 있다. 그리고 실효유전율을 이용한 간단한 강우감쇠 계산 모델은 ITU가 권고하는 강우감쇠모델과 그 결과값들이 비교적 일치한다. 강우율 5 mm/hr인 경우에는 0.7 dB/km의 편차 이내에 일치하며 강우율 25, 50, 100 mm/hr인 경우 50 GHz까지는 실효유전율 모델이 ITU 모델에 비해 최고 5 dB/km 편차로 낮게, 50 GHz 이상 100 GHz까지는 최고 25 dB/km의 편차로 높게 강우감쇠량을 평가하고 있다. 한편, ITU 강우감쇠 계산모델은 40 GHz까지 사용토록 권고되고 있으며 40 GHz 이상 주파수대역에서는 강우감쇠량을 낮게 평가하는 것으로 보고되고 있다.^[9]

강우에 의한 전파감쇠량의 주파수 특성을 살펴보면 공진주파수에 따라 감쇠량이 달라질 수 있음을 알 수 있다. 본 논문에서는 평균 빗방울 크기를 계산하여 공진주파수를 구했으나, 같은 강우율(mm/hr)에서도 빗방울의 크기는 다양하게 분포하므로 평균 빗방울 크기는 달라질 수 있다. 실효유전율을 이용한 간단한 강우감쇠 모델을 이용하여 더욱 정확하게 강우감쇠량을 예측하려면 강우율에 따른 공진주파수에 대한 자세한 고찰이 이루어져야 할 것이다.

참 고 문 헌

[1] T. Oguchi, "Electromagnetic wave propagation and scattering in rain and other hydrometers," *Proc. of The IEEE*, vol. 71, pp. 1029-1078, no. 9, Sep. 1983.

[2] J. O. Laws and D. A. Parsons, "The relation of rain drop size intensity," *Trans. Amer. Geophys. Union*, vol. 24, pp. 452-460, 1943.

[3] J. S. Marshall and W. M. Palmer, "The distribution of raindrop with size," *J. Meteorol.*, vol. 5, pp. 165-166, Aug. 1948.

[4] A. H. Sihvola and J. A. Kong, "Effective permittivity of dielectric mixtures," *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, vol. 26, no. 4, pp. 420-429, July 1988.

[5] A. D. Yaghjian, "Electric dyadic Green's functions in the source region," *Proc. IEEE*, vol. 68, no. 2, pp. 248-263, 1980.

[6] P. S. Ray, "Broadband complex refractive indices of ice and water," *Applied optics*, vol. 11, no. 8, pp. 1836-1844, Aug. 1972.

[7] M. M. Z. Kharadly and A. S. V. Choi, "A simplified approach to the evaluation of EMW propagation characteristics in rain and melting snow," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 36, no. 2, pp. 282-296, Feb. 1988.

[8] 이형수, 김혁제, 신동근, "20GHz 이상 대역에서의 국내 고정 무선중계시스템의 최적 경로길이 설계," *한국전자과학회논문지*, 제7권, 제3호, pp. 263-271, 1996년 8월

[9] T. Ihara, "Applicability of specific rain attenuation models at millimeter wavelengths," *IEICE Trans. Comm.*, vol. E77-B, no. 10, pp. 1275-1278, 1994.

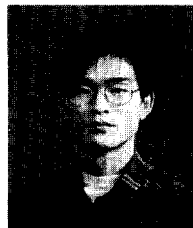
김 혁 제



1993년 : 충남대학교 전자공학과(공학사)
 1995년 : 충남대학교 전자공학과(공학석사)
 1995년~현재 : 한국전자통신연구원 연구원

[주관심 분야] 전파전파 특성, 무선망 설계, 수동초고주파공학

조 삼 모



1992년 : 경북대학교 전자공학과(공학사)
 1994년 : 경북대학교 대학원 전자공학과(공학석사)
 1994년~현재 : 한국전자통신연구원 연구원

[주관심 분야] 전파전파 특성, 무선망 설계