韓國電磁波學會論文誌 第 10 卷 第 5 號 1999年 9月 論文 99-10-5-07

빗방울의 형태에 따른 산란특성 해석 및 강우감쇄 계수 추정

The Analysis of Scattering Characteristics of Raindrops and Estimation of Specific Rain Attenuation for Different Drop Shapes

황정환* · 백정기* · 김양수** · 김영민*** · 최용석** · 이주환** · 박세경**

Jung-Hwan Hwang* · Jeong-Ki Pack* · Yang-Su Kim** · Young-Min Kim*** · Yong-Seok Choi** · Joo-Hwan Lee** · Se-Kyung Park**

요 약

국내환경에 대한 강우 감쇠량의 정확한 예측을 위해서는 실제의 빗방울 모양에 대한 산란특성을 알아야 한다. 본 논문에서는 근사이론모델을 사용하여 빗방울의 산란특성을 해석하고 세가지의 서로 다른 형태의 빗방울에 대한 산란계수 특성을 비교하였다. 또한 Pruppacher-Pitter의 실제 빗방울 모양을 사용하여 국내환경에 적합한 강우감쇄 계수를 추정하고, 기존의 ITU-R 모델과의 차이를 비교 분석하였다.

Abstract

To predict rain attenuation accurately, we must know scattering characteristics of rain-drops for real drop shapes. In this paper, the scattering characteristics of rain-drops are analyzed by an analytical model, and the differences in the characteristics of the forward scattering amplitudes for three different rain-drop shapes are compared. Using the results for the Pruppacher-Pitter's real rain-drop shape, the specific rain attenuation in domestic environment is predicted, and the difference from the ITU-R model is compared and analyzed.

I. 서 론

무선통신시스템에서 시스템의 설계 및 성능계산을 위해서는 강우감쇄에 대한 정확한 정량적 예측이 필요하다. ITU-R에서 자국 모델이 없는 경우에 사용할 수 있도록 400 GHz까지 적용시킬 수 있는 강우감쇠에 대한 예측식이 주어져 있으나 국내환경에 적용시켰을 때 상당한 오차가 예상되고, 또한 40 GHz 이상의 주파수 대역에서는 강우감쇠모델 자체에 문제가 있다[1]~[3]. 그리고 ITU-R 모델은 실제의 빗방울을 편구체로 근사한 이론모델과 Laws-Parsons의 빗방울 크기 분포에 기반을 두고 있다[4].

국내에서는 강우감쇠에 대한 연구가 시작단계에 있으며, 국내환경에 적합한 강우감쇠모델이 아직 없다. 국내환경에 대한 강우감쇠량의 정확한 예측을 위해서는 실제의 빗방울 모양에 대한 주파수에 따른 정확한 산란특성의 해석이 선행되어야 한다. Prup-

* 충남대학교 전파공학과(Dept. of Radio Science & Engineering, Chungnam Nat'l Univ.)
** 한국전자통신연구원(ETRI)
*** 울산기능대학 정보통신과(Dept. of Information & Data Communication, Ulsan Polytechnic Collage.)
· 논 문 번 호 : 990826-07S
· 수정완료일자 : 1999년 9월 15일

pacher-Pitter(P-P)의 실제 빗방울의[5] 산란특성은 Ougchi 등이 point-matching기법을 사용하여 해석한 적이 있으나 강우감쇄계수의 계산에 사용될 수 있을 정도의 충분한 데이터가 주어지지 않고 또한 빗방울의 모양에 따른 강우감쇄계수의 차이도 분석하지 않았다[6].

따라서 본 논문에서는 국내환경에 대한 강우감쇄 모델 개발의 일환으로 Pruppacher-Pitter의 실제 빗방울과 이를 근사한 편구체 모양에 대해 Morrisone 등이 편구체 빗방울의 해석에 사용한 최소자승근사를 이용한 이론모델[7]을 사용하여 빗방울의 산란특성을 해석하고 빗방울의 형태에 따른 산란계수특성과 강우감쇄계수 특성을 비교하였다. 그리고 이전에 제안한 빗방울의 크기분포[8]를 토대로 국내 강우환경에 적합한 강우 감쇠계수를 추정하고 기존의 ITU-R 모델과의 차이를 비교, 분석하였다.

Ⅱ. 근사이론모델

빗방울이 종속도로 떨어질 때 빗방울의 모양은 구형이 아니며 공기의 압력으로 인해 그림 1과 같이 변형된다. 회전축을 지나는 단면의 모양이 그림 1과 같은 빗방울의 표면은

$$\Gamma = a_0\left(1+\sum_{n=0}^{\infty} c_n \cos n\theta\right) \qquad (1)$$

로 나타낼 수 있다[6]. 여기서 a_0는 실효반경, 즉 변형된 빗방울과 동일한 체적을 갖는 구체의 반경이며, c_n은 변형상수를 나타낸다.

Pruppacher와 Pitter는 빗방울 표면 내외부에 대한 압력의 평형방정식을 이용하여 변형상수 c_n을 계산하는 방법을 고안하였다[5]. 실효반경이 0.25~3.25 mm인 빗방울에 대한 이론적인 모양은 그림 2와 같다.

그림 3처럼 전파상수가 k_0인 입사파의 진행방향이 y축에 수직이고 z축과 α의 각도를 이룰 때 임의의 방향으로 편파된 입사파의 전계는 두 개의 편파

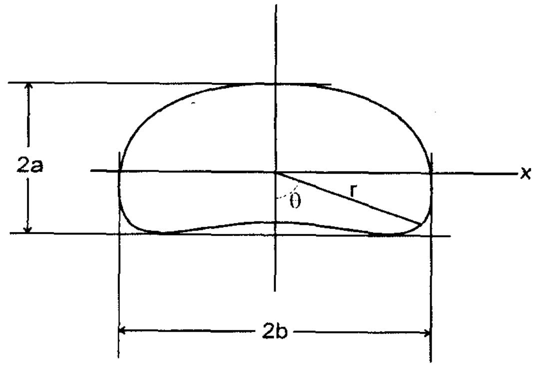


그림 1. 변형된 빗방울의 단면도

Fig. 1. Cross-section of distorted rain-drop.

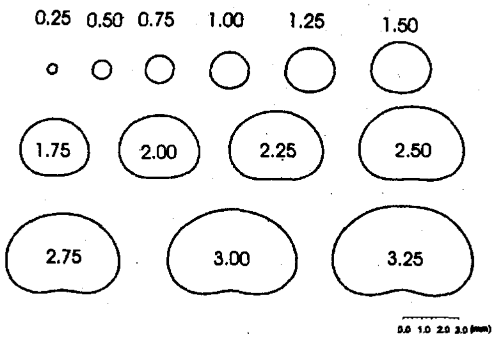


그림 2. Pruppacher-Pitter의 빗방울 모양

Fig. 2. Pruppacher-Pitter's rain-drop shapes.

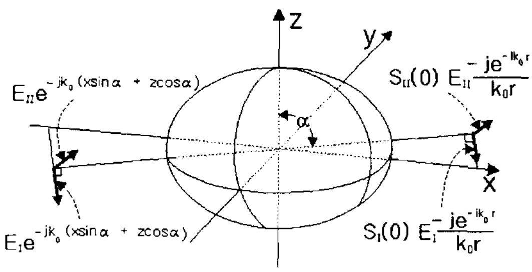


그림 3. 빗방울 산란에 대한 좌표축 및 편파

Fig. 3. The coordinate axes and polarizations for the scattering by a rain-drop.

성분의 선형조합으로 나타낼 수 있다.

즉,

$$\vec{E}_I^i = E_I(\hat{x}\cos\alpha - \hat{z}\sin\alpha) \cdot \exp[-jk_0(x\sin\alpha + z\cos\alpha)],$$

$$\vec{H}_I^i = \hat{y}\frac{k_0}{\omega\mu_0}E_I \cdot \exp[-jk_0(x\sin\alpha + z\cos\alpha)], \quad (2)$$

$$\vec{E}_{II}^i = E_{II}\hat{y}\exp[-jk_0(x\sin\alpha + z\cos\alpha)],$$

$$\vec{H}_{II}^i = \frac{-k_0}{\omega\mu_0}E_{II}(\hat{x}\cos\alpha - \hat{z}\sin\alpha) \cdot \exp[-jk_0(x\sin\alpha + z\cos\alpha)] \quad (3)$$

경계조건 적용시의 편의를 위해 위의 입사평면파를 ϕ에 대한 복소 Fourier 급수로 표현하면 다음과 같다.

$$\vec{E}^i = \sum_{m=-\infty}^{\infty}\vec{e}_m(r,\theta)e^{-jm\phi},$$

$$\vec{H}^i = \sum_{m=-\infty}^{\infty}\vec{h}_m(r,\theta)e^{-jm\phi} \quad (4)$$

식 (2)와 (3)으로부터 두 편파에 대한 표현식은

$$\vec{e}_m^I(r,\theta) = E_I\vec{f}_m(r,\theta),$$

$$\vec{h}_m^I(r,\theta) = E_I\frac{k_0}{\omega\mu_0}\vec{g}_m(r,\theta), \quad (5)$$

$$\vec{e}_m^{II}(r,\theta) = E_{II}\vec{g}_m(r,\theta),$$

$$\vec{h}_m^{II}(r,\theta) = -E_{II}\frac{k_0}{\omega\mu_0}\vec{f}_m(r,\theta), \quad (6)$$

이고, $\vec{f}_m$과 $\vec{g}_m$은 각각

$$\vec{f}_m(r,\theta) = (-j)^m\exp(-jk_0 r\cos\alpha\cos\theta) \cdot \Big[J_m(k_0 r\sin\alpha\sin\theta)\sin\alpha(\hat{\theta}\sin\theta - \hat{r}\cos\theta) \cdot jJ'_m(k_0 r\sin\alpha\sin\theta)\cos\alpha(\hat{r}\sin\theta + \hat{\theta}\cos\theta) + \hat{\phi}\frac{mJ_m(k_0 r\sin\alpha\sin\theta)}{k_0 r\sin\alpha\sin\theta}\cos\alpha\Big] \quad (7)$$

$$\vec{g}_m(r,\theta) = -(-j)^m\exp(-jk_0 r\cos\alpha\cos\theta) \cdot \left[\frac{mJ_m(k_0 r\sin\alpha\sin\theta)}{k_0 r\sin\alpha\sin\theta}\right] \cdot (\hat{r}\sin\theta + \hat{\theta}\cos\theta) - \hat{\phi}jJ'_m(k_0 r\sin\alpha\sin\theta) \quad (8)$$

으로 정의된 벡터함수이다. 윗 식에서 J_m은 m차 제 1 종 Bessel 함수이며 J'_m은 변수 전체에 대한 미분값을 나타낸다.

입사파에 의한 산란 및 투과 전자계는 다음과 같이 정의된 구형벡터파동함수 $\vec{M}_{mn}$과 $\vec{N}_{mn}$의 선형 조합으로 나타낼 수 있다.

$$\nabla\times\vec{M} = k\vec{N}, \quad \nabla\times\vec{N} = k\vec{M} \quad (9)$$

$$\vec{M}_{mn(k)} = z_n(kr)e^{-jm\phi} \cdot \left[\frac{-jm}{\sin\theta}P_n^{|m|}(\cos\theta)\hat{\theta} - \frac{dP_n^{|m|}(\cos\theta)}{d\theta}\hat{\phi}\right] \quad (10)$$

$$\vec{N}_{mn}(k) = e^{jm\phi}\left\{n(n+1)\frac{z_n(kr)}{kr}P_n^{|m|}(\cos\theta)\hat{r} + \left[\frac{z_n(kr)}{kr} + z_n'(kr)\right] \times \left[\frac{dP_n^{|m|}(\cos\theta)}{d\theta}\hat{\theta} - \frac{jm}{\sin\theta}P_n^{|m|}(\cos\theta)\hat{\phi}\right]\right\} \quad (11)$$

여기서 $P_n^{|m|}$은 associated Legendre 다항식으로서

$$P_n^m(\cos\theta) = (-1)^m\sin^m\frac{d^m P_n(\cos\theta)}{d(\cos\theta)^m} \quad (12)$$

으로 정의된다. 그리고 z_n은 n차 구형 Bessel 함수로서 빗방울의 외부에서는 방사조건을 만족시키기 위해서 제 2종 구형 Hankel 함수 $h_n^{(2)}(kr)$로 주어지며, 빗방울 내부에서는 전자계의 크기가 유한하기 때문에 제 1종 구형 Bessel 함수 $J_n(kr)$로 주어진다. 또한 m은 +와 -의 값을 모두 가지는 정수이며 $n \geq |m|(n \neq 0)$이어야 한다.

빗방울 외부에서 산란파의 전계와 자계는

$$\vec{E}^s = -\sum_{m=-\infty}^{\infty}\sum_{n\geq|m|,\,n\neq 0}[a_{mn}\vec{M}_{mn}(k_0) + b_{mn}\vec{N}_{mn}(k_0)] \tag{13}$$

$$\vec{H}^s = \frac{-jk_0}{\omega\mu_0}\sum_{m=-\infty}^{\infty}\sum_{n\geq|m|,\,n\neq 0}\cdot[a_{mn}\vec{N}_{mn}(k_0) + b_{mn}\vec{M}_{mn}(k_0)] \tag{14}$$

와 같이 나타낼 수 있으며, 여기서 a_{mn}과 b_{mn}은 미지의 모드전개 상수이다.

빗방울 내부의 투과전자계 역시 구형파동함수의 선형조합으로 나타내면

$$\vec{E}^t = -\sum_{m=-\infty}^{\infty}\sum_{n\geq|m|,\,n\neq 0}\cdot[c_{mn}\vec{M}_{mn}(k_1) + d_{mn}\vec{N}_{mn}(k_1)] \tag{15}$$

$$\vec{H}^t = \frac{-jk_1}{\omega\mu_0}\sum_{m=-\infty}^{\infty}\sum_{n\geq|m|,\,n\neq 0}\cdot[c_{mn}\vec{N}_{mn}(k_1) + d_{mn}\vec{M}_{mn}(k_1)] \tag{16}$$

로 주어지고, c_{mn}과 d_{mn}은 미지의 모드전개 상수를 나타낸다.

빗방울의 표면을

$$r = R(\theta),\ (0 \leq \theta \leq 2\pi,\ 0 \leq \phi \leq 2\pi) \tag{17}$$

라 할 때 임의의 θ에 대한 접선방향의 벡터 $\vec{t}$는

$$\vec{t} = \hat{\theta} + \frac{1}{R}\frac{dR}{d\theta}\hat{r} \tag{18}$$

로 주어지므로 빗방울 표면에서의 경계조건은

$$E_\phi^i + E_\phi^s = E_\phi^t \tag{19}$$

$$H_\phi^i + H_\phi^s = H_\phi^t \tag{20}$$

$$E_\theta^i + E_\theta^s + \frac{1}{R}\frac{dR}{d\theta}(E_r^i + E_r^s) = E_\theta^t + \frac{1}{R}\frac{dR}{d\theta}E_r^t \tag{21}$$

$$H_\theta^i + H_\theta^s + \frac{1}{R}\frac{dR}{d\theta}(H_r^i + H_r^s) = H_\theta^t + \frac{1}{R}\frac{dR}{d\theta}H_r^t \tag{22}$$

로 주어진다.

식 (4), (13)~(16)에 대해 위의 경계조건을 적용하면 다음과 같다.

$$K_{mq}(\theta) - \sum_{n\geq m,\,n\neq 0}[a_{mn}A_{mnq}(\theta) + b_{mn}B_{mnq}(\theta) + c_{mn}C_{mnq}(\theta) + d_{mn}D_{mnq}(\theta)] = 0 \tag{23}$$

윗 식에서 q=1, 2, 3, 4에 대한 K_{mq}는

$$K_{m1}(\theta) = e_{m\phi}(R(\theta),\theta), \tag{24}$$

$$K_{m2}(\theta) = \frac{-j\omega\mu_0}{k_0}h_{m\phi}(R(\theta),\theta), \tag{25}$$

$$K_{m3}(\theta) = e_{m\theta}(R(\theta),\theta) + \frac{1}{R(\theta)}\frac{dR}{d\theta}e_{mr}(R(\theta),\theta), \tag{26}$$

$$K_{m4}(\theta) = \frac{-j\omega\mu_0}{k_0}\left[h_{m\theta}(R(\theta),\theta) + \frac{1}{R(\theta)}\frac{dR}{d\theta}h_{mr}\cdot(R(\theta),\theta)\right] \tag{27}$$

로 주어진다.

최소자승근사방법은 식 (23)의 경계조건을 근사적으로 만족시키기 위해 주어진 m에 대해, θ_{lm}, (l=1, ..., L_m)에서의 자승오차의 가중자승합 $\triangle_m$을 최소화 시키는 것이다.

즉,

$$\triangle_m \equiv \sum_{q=1}^{4}\omega_{mq}\sum_{l=1}^{L_m}|K_{mq}(\theta_{lm}) - \sum_{n=m,\,n\neq 0}^{N_m}[a_{mn}A_{mnq}(\theta_{lm}) + b_{mn}B_{mnq}(\theta_{lm}) + c_{mn}C_{mn}(\theta_{lm}) + d_{mn}D_{mnq}(\theta_{lm})]|^2,\ (m=0,\ .....,\ M) \tag{28}$$

여기서 ω_{mq}는 가중치이며 θ_{lm}은 0~π사이에서

적절히 선택된 점들이다. 본 논문에서는 $\omega_{mq}=1$, N_m-N_0, $(m=0, 1, ..., M)$으로 두었다.

최소자승근사방법에 의해 모드 전개 상수들이 얻어지면 원거리장 영역에서의 전방산란 크기함수(forward scattering amplitude)는 다음 식과 Hankel 함수의 점근 표현식으로부터 구할 수 있다.

$$S_I(0) = \frac{1}{E_I}(\hat{x}\cos\alpha - \hat{z}\sin\alpha) \cdot \lim_{r\to\infty}\{jk_0 re^{jk_0 r}\vec{E}_I^s|_{\theta=\alpha,\phi=0}\} \tag{29}$$

$$S_{II}(0) = \frac{1}{E_{II}}\hat{y} \cdot \lim_{r\to\infty}\{jk_0 re^{jk_0 r}\vec{E}_{II}^s|_{\theta=\alpha,\phi=0}\} \tag{30}$$

Ⅲ. 해석결과

3-1 빗방울 형태에 따른 강우입자의 산란특성

그림 4~6은 주파수가 12.25, 19.45, 40 GHz일 때의 구형(Mie), 편구형(Spheroid) 및 P-P빗방울의 크기에 따른 산란특성을 비교한 것이다. 여기서 12.25 GHz와 19.45 GHz는 우리나라 위성통신에 사용되는 주파수이며, 40 GHz는 ITU-R 모델을 적용시킬 수 있는 한계주파수이다. 그리고 구형 빗방울의 반경은 식 (1)에 주어진 실효반경 a_0이며, 편구형 빗방울의 단축 a와 장축 b의 축비 τ는

$$\tau = a/b = 1 - 0.41a_0/4.5 \tag{31}$$

로 주어진다. 이때 a와 b는 각각 $a = a_0/\tau^{2/3}$, $b = a_0/\tau^{1/3}$으로 주어진다.

빗방울의 반경이 증가하면 단축과 장축의 길이의 차이가 증가하므로 수평편파와 수직편파에 대한 산란계수(전방산란 크기함수)의 편차가 커진다. 그리고 주파수가 증가할수록 파장에 대한 상대적인 축간 길이 차이가 커지기 때문에 두 편파에 대한 산란계수의 편차도 역시 증가한다. 두 편파의 평균치와 구형 빗방울의 산란계수를 비교해 보면 12.25 GHz인 경우에는 구형 빗방울의 산란계수는 평균치와 거의 같으나 19.45 GHz와 40 GHz인 경우에는 수평편파쪽으로 치우쳐져 있으며 주파수에 따라 그 차이가 증가한다. 또한 40 GHz인 경우를 제외하고는 편구형

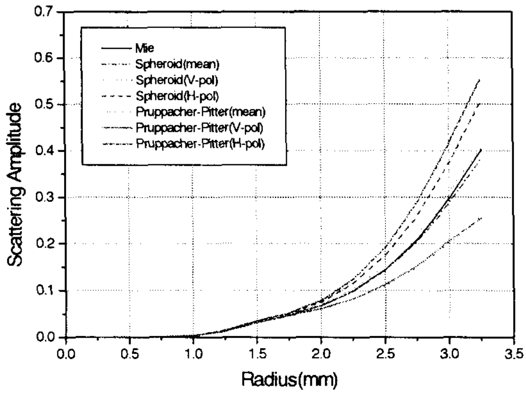


그림 4. 구형, 편구형 및 P-P빗방울의 반경에 따른 산란특성(f = 12.25 GHz)

Fig. 4. Scattering characteristics of spherical, elliptic, and P-P rain-drop as a function of radius(f = 12.25 GHz).

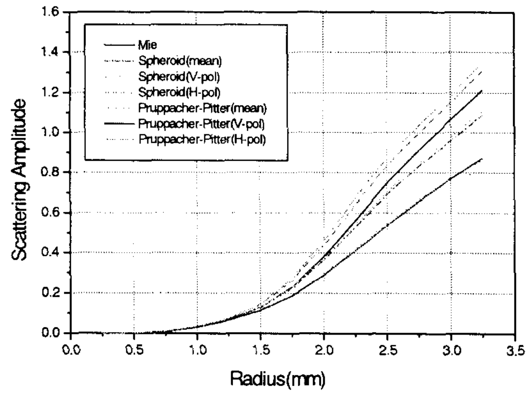


그림 5. 구형, 편구형 및 P-P빗방울의 반경에 따른 산란특성(f = 19.45 GHz)

Fig. 5. Scattering characteristics of spherical, elliptic, and P-P rain-drop as a function of radius(f = 19.45 GHz).

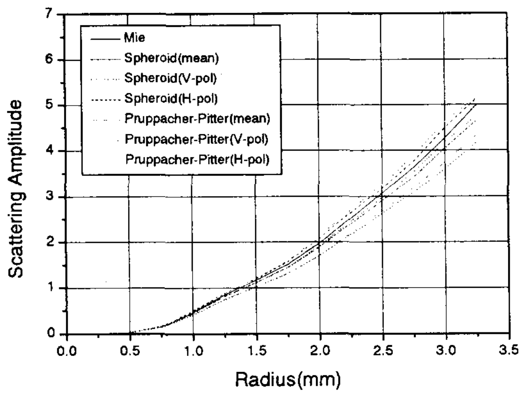


그림 6. 구형, 편구형 및 P-P빗방울의 반경에 따른 산란특성(f = 40 GHz)

Fig. 6. Scattering characteristics of spherical, elliptic, and P-P rain-drop as a function of radius(f = 40 GHz).

빗방울과 P-P빗방울의 수직편파에 대한 산란계수는 같고 수평편파의 경우는 약간의 편차를 보이고 있으며, 40 GHz인 경우에는 두 편파에 대한 산란계수 모두가 편차를 보이고 있다.

3-2 빗방울 형태에 따른 강우감쇄계수 특성

본 절에서는 빗방울 형태에 따른 강우감쇠특성을 살펴보고 본 논문에서 제시한 강우감쇠계수 추정모델과 ITU-R모델의 차이를 비교, 분석하고자 한다.

강우감쇄계수 는 단위 길이당 강우감쇄량으로서

$$\gamma = 20\ \log e \times 10^3 \int_0^{D_m} \frac{2\pi}{k^2} \mathrm{Re}\{S(0)\} N(D) dD \quad (32)$$

로 주어진다[4]. 여기서 $S(0)$는 전방산란 크기함수를 나타내며, $N(D)$는 빗방울 크기 분포로서 $N(D)dD$는 직경이 D(mm)와 $D+dD$(mm)사이에 분포하는 빗방울의 밀도(m^3)이다. 윗 식에 주어진 것과 같이 강우감쇄 계수는 빗방울의 크기분포의 함수이며 이 분포는 동일한 강우율에 대해서도 강우환경에 따라 다르다. 본 논문에서 빗방울 크기분포는 이전 논문에서 국내 환경에 대해 밀리미터파대역까지 적용시킬 수 있는 모델로 제안한[8]

$$N(D) = N_0\, e^{-\Lambda D}, \ \ (\Lambda = 6.6R^{-0.33})$$

$$N_0 = 4.86R/[\Lambda^{-4} - (\Lambda + 0.582)^{-4}] \quad (33)$$

를 이용하였다. 윗 식에서 은 단위시간당 강우량, 즉 강우율[mm/h]을 나타낸다.

그림 7~9는 12.25, 19.45, 40 GHz에서 구형(Mie), 편구형(Spheroid) 및 Pruppacher-Pitter 빗방울의 강우율에 따른 강우감쇠계수(Specific attenuation)를 보인 것이다. 강우율이 증가할수록 큰 빗방울의 영향이 커지므로 앞 절에서 언급한 바와 같이 수평과 수직편파에 대한 편차는 증가하고 있다. 또한 구형, 편구형 및 P-P 빗방울에 대한 강우감쇄계수의 평균차를 비교해 보면 12.25 GHz에서는 구형 빗방울 모델의 강우감쇄계수가 편구형이나 P-P 빗방울 모델에 비해 더 적으나 주파수가 증가할수록 그 레벨이 증가하여 40 GHz에서는 최대 1 dB/km 정도의 편차를 보인다. 그리고 편구형 빗방울과 Purppacher-Pitter 빗방울의 강우감쇄계수는 40 GHz에서는 최대

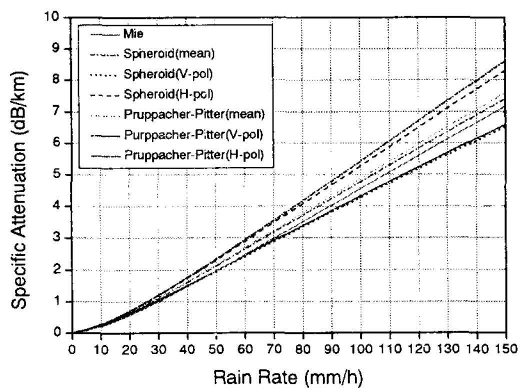


그림 7. 구형, 편구형 및 P-P빗방울에 대한 강우율에 따른 강우감쇠계수 특성(f=12.25 GHz)

Fig. 7. Characteristics of specific rain-attenuation for elliptic, and P-P rain-drop as a function of rain rate(f = 12.25 GHz).

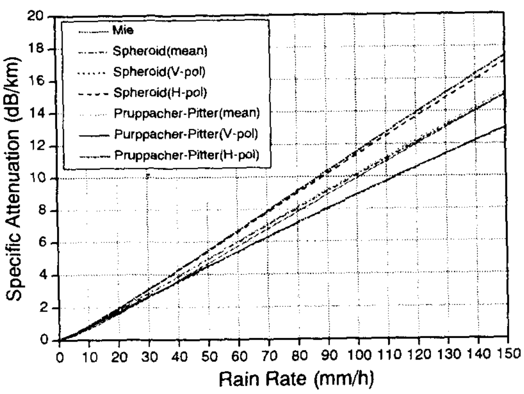


그림 8. 구형, 편구형 및 P-P빗방울에 대한 강우율에 따른 강우감쇠계수 특성(f = 19.45 GHz)

Fig. 8. Characteristics of specific rain-attenuation for elliptic, and P-P rain-drop as a function of rain rate(f = 19.45 GHz).

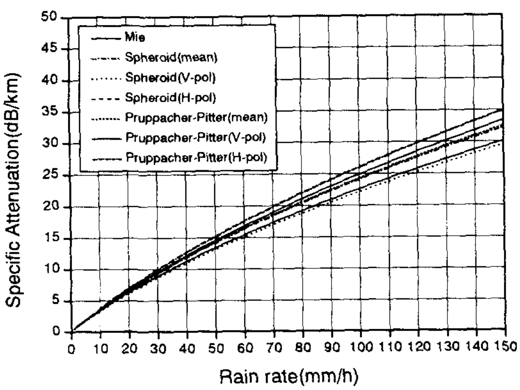


그림 9. 구형, 편구형 및 P-P빗방울에 대한 강우율에 따른 강우감쇠계수 특성(f = 40 GHz)

Fig. 9. Characteristics of specific rain-attenuation for elliptic, and P-P rain-drop as a function of rain rate(f = 40 GHz).

편차가 약 0.5 dB/km 정도이나 다른 주파수의 경우에는 그 편차가 무시 가능하다. 따라서 강우율이 그리 크지 않을 때는 근사적인 편구형 빗방울 모델을 사용하여도 무관할 것으로 판단된다.

그림 10~12는 12.25, 19.45, 40 GHz에서 Pruppacher-Pitter의 실제 빗방울 모양 및 국내 환경에 적

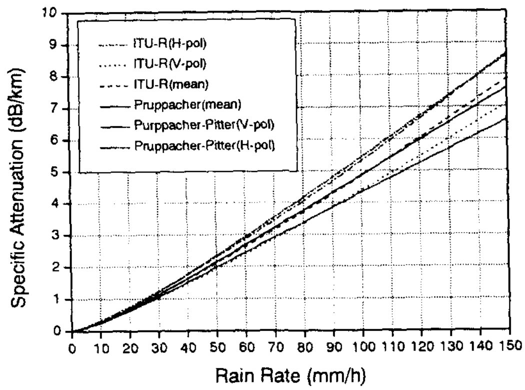


그림 10. ITU-R모델과 새로운 모델의 강우감쇠계수 특성(f=12.25 GHz)

Fig. 10. Characteristics of specific rain-attenuation for ITU-R and new model(f = 12.25 GHz).

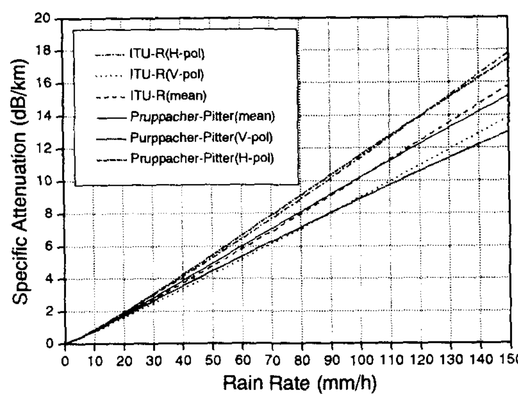


그림 11. ITU-R모델과 새로운 모델의 강우감쇠계수 특성(f = 19.45 GHz)

Fig. 11. Characteristics of specific rain-attenuation for ITU-R and new model(f = 19.45 GHz).

합한 빗방울 크기 분포를 사용한 본 논문의 강우감쇄계수 측정모델과 편구형 빗방울 및 Laws-Parsons 분포를 사용한 ITU-R 모델의 강우감쇠계수 추정치를 비교한 것이다. 주파수가 12.25 GHz와 19.45 GHz인 경우 수평편파에 대한 특성은 큰 차이가 없으나 수직편파의 경우 최대편차가 12.25 GHz에서는 약 0.5 dB/km, 19.45 GHz에서는 약 1 dB/km 정도이다.

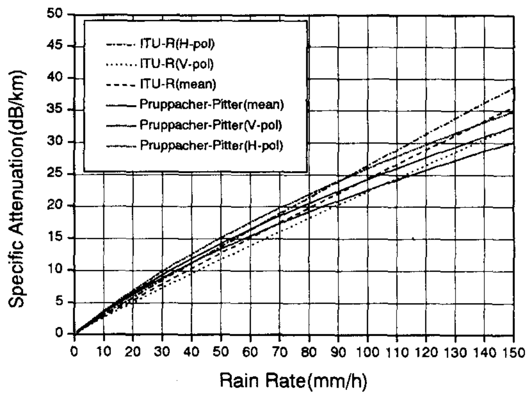


그림 12. ITU-R모델과 새로운 모델의 강우감쇠계수 특성(f = 40 GHz)

Fig. 12. Characteristics of specific rain-attenuation for ITU-R and new model(f = 40 GHz).

하지만 주파수가 40 GHz인 경우 수직편파에 대해서는 최대편차가 약 3 dB/km, 수평편파에 대해서는 최대편차가 약 5 dB/km정도이다. 두 모델사이의 편차는 주로 빗방울 크기 분포의 차이에 기인하는데 주파수가 증가하면 그 편차가 더 커져서 잘 알려진 바와 같이 ITU-R 모델을 적용시킬 수 없다[8]. 하지만 본 논문의 추정모델은 밀리미터파대역까지 적용 가능하다.

Ⅳ. 결 론

본 논문에서는 최소자승근사를 이용한 이론모델 사용하여 Pruppacher-Pitter의 실제 빗방울과 이를 근사한 편구체 빗방울 모양에 대한 산란특성을 해석하고 빗방울의 형태에 따른 산란계수 특성과 강우감쇄계수 특성을 비교하였다. 그리고 Pruppacher-Pitter의 빗방울에 의한 산란계수와 국내환경에 적합하며 밀리미터파 대역까지 적용 가능한 빗방울 크기분포를 사용한 강우감쇄계수 측정모델을 제시하고, ITU-R 모델과 강우감쇠계수의 차이를 비교, 분석하였다.

산란계수와 강우감쇠계수는 빗방울의 모양에 따라 다소의 편차를 보이며 주파수가 증가할수록 그 편차는 커지나 강우율이 그리 크지 않을 때는 실제 모양의 Pruppacher-Pitter 빗방울 대신 근사적인 편구형 빗방울 모양을 사용하여도 무방할 것으로 판단된다.

또한 본 논문의 강우감쇠계수 추정모델과 ITU-R 모델을 비교해 본 결과 주파수가 증가할수록 그 편차는 커지며, 이것은 이전 논문[8]에서 논의한 바와 같이 주로 빗방울의 크기 분포에 기인한다. ITU-R 모델은 밀리미터파 대역에서는 적용시킬 수 없으며 빗방울의 크기분포는 동일한 강우율에 대해서도 강우지역에 따라 다르기 때문에 각국의 강우환경에 적합한 모델을 사용하여야 한다. 본 논문의 추정모델은 국내 강우환경과 비슷한 지역에 적용시킬 수 있는 범용모델로서 국내의 측정치에 근사한 것이 아니므로 다소의 오차가 있을 수 있다. 보다 정확한 강우감쇠계수 추정을 위해서는 국내환경에서의 빗방울 크기분포 및 강우감쇠에 대한 정밀한 측정데이터가 확보되어야 하겠다.

참 고 문 헌

[1] ITU-R, "Sepeific Attenuation Model for Rain for Use in Prediction Methods," Rec. 838, 1994.

[2] ITU-R, "Characteristics of Precipitation for Propagation Modelling," Rec. 837-1, 1994.

[3] ITU-R, "Propagation Data and Prediction Methods Required for Design of Earth-Space Telecommunication Systems," Rec. 618-5, 1997.

[4] D. Maggiori, "Computed Transmission through Rain in th 1-400 GHz Frequency Range for Spherical and Elliptical Drops and Any polarization," *Alta Frequenza*., vol. L, no. 5, pp. 262-272, 1943.

[5] H. R. Pruppacher and R. L. Pitter, "A

Semiemprical Determination of the Shape of Cloud and Rain Drops," *J. Atmospheric Sci.*, vol. 28, no. 1, pp. 86-94, 1970.

[6] T. Oguchi, "Scattering Progerties of Pruppacher-and-Pitter Form Raindrops and Cross Polarization due to Rain Calculations at 11, 13, 19.3, and 34.8 GHz," *Radio Sci.*, vol. 12, no. 1, pp. 41-51, 1977.

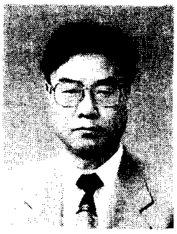
[7] J. A. Morrison and M. J. Cross, "Scattering of a Plane Electromagnetic Wave by Axisymmetric Raindrops," *Bell Sys. Tech. J.*, vol. 53, no. 6, pp. 955-1019, 1974.

[8] 조삼모, 김양수, 백정기, 이성수, 김혁제, "국내 환경에 적합한 밀리미터파대역에서의 강우감쇄 추정," 한국통신학회논문지, 제 23 권, 제 7 호, pp. 1755-1763, 1998.

황 정 환

1998년: 충남대학교 전자공학과(공학사)
1998년 3월~현재: 충남대학교 전파공학과 석사과정
[주 관심분야] 전자파 전파 및 산란

백 정 기



1978년: 서울대학교 전자공학과(공학사)
1984년: Virgrinia Tech.(공학석사)
1988년: Virgrinia Tech.(공학박사)
1978년 3월~1983년 2월: 국방과학연구소
1988년 10월~1989년 2월: 한국전자통신연구원
1989년 3월~1995년 2월: 동아대학교 전자공학과
1995년 2월~현재: 충남대학교 전파공학과 부교수
[주 관심분야] 전자파 전파 및 산란, 초고주파 회로

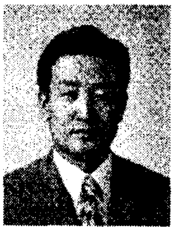
김 양 수

1997년: 충남대학교 전자공학과(공학사)
1999년: 충남대학교 전파공학과(공학석사)
1999년 3월~현재: 한국전자통신연구원 무선방송기술연구소 연구원
[주 관심분야] 전자파 전파 및 산란

김 영 민

1986년: 영남대학교 전자공학과(공학사)
1995년: 동아대학교 전자공학과(공학석사)
1995년 3월~현재: 동아대학교 전자공학과(공학박사)
1987년 6월~1992년 9월: 삼성항공(주) 생산기술부 대리
1997년~현재: 울산기능대학 정보통신과 전임강사.

최 용 석



1982년: 연세대학교 천문우주학과(이학사)
1994년: 동경대학교 대학원 전파물리학과(이학박사)
1983년~1986년: 공군 레이다 분석관(중위)
1987년 2월~현재: 한국전자통신연구원 무선방송기술연구소 선임연구원
[주 관심분야] 전파전파 특성 예측 모델링, 위성 및 지상 밀리미터파 무선통신

이 주 환

1988년: 서강대학교 전자공학과(공학사)
1999년: 충남대학교 전파공학과(공학석사)
1990년~현재: 한국전자통신연구원 무선방송기술연구소 선임연구원
[주 관심분야] 전파전파 특성 예측 모델링, 위성 및 지상 밀리미터파 무선통신

박 세 경

1984년: 경북대학교 전자공학과(공학사)
1999년: 충남대학교 전파공학과(공학석사)
1984년 7월~1985년 8월: (주)금성사
1985년 9월~현재: 한국전자통신연구원 무선방송기술연구소 선임연구원
[주 관심분야] 위성통신망 설계, 위성망간 간섭분석, 위성망 성능예측