

Ka 및 mm파 대역에서 강우감쇠에 영향을 주는 파라미터 분석

Analysis of Parameters Affecting the Attenuation by Rain in Ka and mm-wave Bands

김정호* · 유명완* · 김희찬** · 류규태** · 이범선* · 김영수* · 서덕영*

Jung-Hyo Kim* · Myung-Wan Lyou* · Hee-Chan Kim** · Kyoo-Tae Ryoo** · Bom-Son Lee* · Young-Soo Kim* · Doug-Young Suh*

요 약

Ka 및 mm파 대역에서의 강우감쇠는 무선회선설계에 큰 영향을 미친다. 본 논문에서는 전반적인 기초가 되는 Mie 산란이론을 이용하여 국내환경에 적합한 강우감쇠를 추정하기 위해 중요한 요소인 빗방울 크기분포를 여러 자료를 비교하여 분석하였고, 일반화된 식을 통해 수치해석적 접근을 시도함으로써 각 파라미터별 강우감쇠에 미치는 정도를 분석하여 이론적으로 국내 강우환경에서의 강우감쇠를 추정하기 위한 근거를 제공하고자 하였다.

Abstract

Design of wireless link in Ka and mm-wave bands is critically affected by rain attenuation. In this paper, we compared and analyzed the main distributions of rain drop size to estimate the rain attenuation which can be used in domestic environment. Mie scattering theory was checked to agree with Rayleigh theory in its low frequency limit and agree with optical scattering theory in its high frequency limit. We intended to provide more specific criteria to estimate rain attenuation with a generalized approach.

I. 서 론

최근의 무선통신 시스템 개발은 위성통신이나 지상통신의 많은 부분에서 광대역 신호전송을 위해 고주파대에서 이루어지고 있다. 무궁화 3호나 차세대 위성시스템에서는 Ka 대역이 사용되며, 양방향 멀티미디어 통신을 지향하는 LMDS도 28 GHz 주파수대에서 기본설계가 이루어지고 있다. 국내에서도 그 추진 가능성이 높은 것으로 알려지고 있는 성층권 비행선을 이용한 무선 시스템도 30~50 GHz대역에서

설계가 이루어지고 있다. 무선회선을 설계하기 위해서는 그 전파경로상의 손실 정도를 정확하게 추정하는 것이 중요하다. 10 GHz 이상 주파수대역에서는 강우에 의한 전파의 감쇠가 매우 크므로 그 강우감쇠를 정확히 예측하기 위한 이론적, 실험적 연구가 필수적이다. 외국의 경우 그 나라 환경에서의 주파수대별 측정에 의하여 비교적 정확하고 과학적인 데이터베이스를 가지고 있다. 거기에 반해 우리나라에서는 강우감쇠를 추정하기 위한 강우데이터들이 충분하지 않다. 그러나 이러한 환경에서도 국내에서

* 경희대학교 공과대학 전자정보학부
** 한국통신 위성사업단
· 논문 번호 : 990913-071
· 수정완료일자 : 1999년 11월 24일

이러한 데이터들을 기본으로 하여 고주파대역에 있어서의 강우감쇠를 예측하기 위한 시도들이 있어왔다^[1]. 본 논문에서는 모든 주파수에 대해서 적용이 가능한 Mie 산란이론을 이용하여 여러 가지 파라미터가 강우감쇠에 주는 영향을 고찰하고 그 파라미터들을 함수로 하는 강우감쇠데이터를 제시하였다. 이러한 파라미터 분석연구는 향후 국내 강우감쇠 모델 확립에 도움이 될 수 있을 것으로 보인다.

II. 강우감쇠 파라미터 분석

2-1 Mie Scattering Theory

Mie 산란이론^[2]에 의하면 구형 유전체(그림 1)에 대한 소거 단면적은 아래와 같이 주어진다.

$$\sigma_i = \frac{2\pi a^2}{a^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) [Re(a_n + b_n)] [m^2] \quad (1)$$

이 식에 나타난 부호는 다음과 같이 표현된다.

$$a_n = \frac{\mu_1 \Psi_n(a) \Psi_n'(\beta) - \mu_2 m \Psi_n(\beta) \Psi_n'(a)}{\mu_1 \zeta_n(a) \Psi_n(\beta) - \mu_2 m \Psi_n(\beta) \zeta_n(a)} \quad (2)$$

$$b_n = \frac{\mu_2 m \Psi_n(a) \Psi_n'(\beta) - \mu_1 \Psi_n(\beta) \Psi_n'(a)}{\mu_2 m \zeta_n(a) \Psi_n(\beta) - \mu_1 \Psi_n(\beta) \zeta_n(a)} \quad (3)$$

$$\Psi_n(x) = x j_n(x) = \sqrt{\pi x/2} J_{n+1/2}(x) \quad (4)$$

$$\zeta_n(x) = x h_n^{(2)}(x) = \sqrt{\pi x/2} H_{(n+1/2)}^{(2)}(x) \quad (5)$$

$$m = k_1/k_2 = \sqrt{\mu_1 \epsilon_1 / \mu_2 \epsilon_2} \quad (6)$$

$$\alpha = k_1 a, \beta = k_2 a \quad (7)$$

그림 2는 식 (1)을 이용하여 정규화된 소거단면

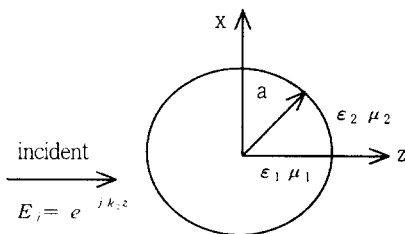


그림 1. 구형유전체 개략도
Fig. 1. Incident wave on a spherical water drop.

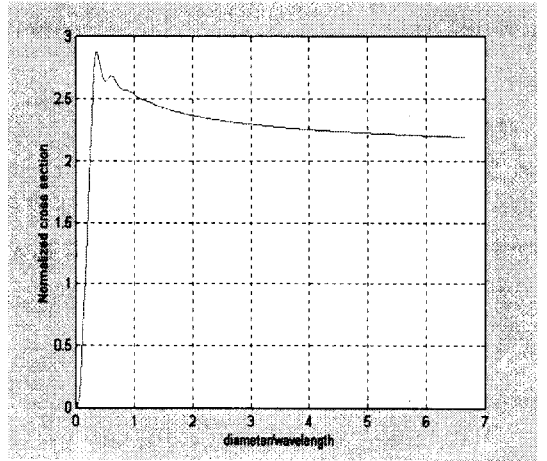


그림 2. $\frac{d}{\lambda}$ 에 대한 정규화된 소거단면적
Fig. 2. Normalized cross section for $\frac{d}{\lambda}$.

적을 계산한 것인데 파장에 비해 유전체의 크기가 매우 커질 때(고주파 한계) 그 유전체 단면적의 두 배에 수렴함을 알 수 있다. 여기서 유전율은 문헌 [6]에서 주어진 주파수에 따른 유전율 변화식을 사용하였으며 투자율은 1로 하였다.

그림 3은 문헌 [2]에서 주어진 Rayleigh 식과 식 (1)을 이용한 소거 단면적을 나타내는데 파장에 비해 빗방울 지름이 매우 작을 경우(저주파 한계)서로 일치함을 알 수 있다.

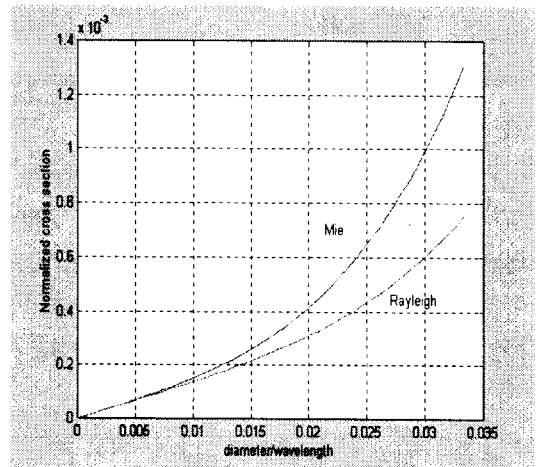


그림 3. $\frac{d}{\lambda}$ 에 대한 정규화된 소거단면적
Fig. 3. Normalized cross section for $\frac{d}{\lambda}$.

2-2 강우감쇠의 추정식

강우환경에서의 전파전파시 서로 다른 크기를 갖는 많은 빗방울에 의해 산란과 흡수가 일어난다. 따라서 단위 체적당 빗방울의 개수분포가 주어진 경우 단위면적당 미소 거리 dz 의 거리를 진행한다고 하였을 때

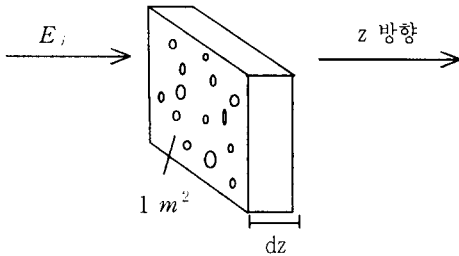


그림 4. 강우공간상에서의 전파
Fig. 4. Wave propagation in rainfall space.

전계는 진행거리 z 의 함수가 되며 전력밀도 또한 z 의 함수가 된다. 따라서 전력밀도 $P [W/m^2]$ 의 거리에 대한 변화량은

$$\begin{aligned} \frac{dP}{dz} &= -\frac{1}{2} Y_0 |E|^2 \int_0^\infty \sigma_i(D)N(D)dD \\ &= -P \int_0^\infty \sigma_i(D)N(D)dD \\ &= -P(z)A(z) \end{aligned} \quad (8)$$

으로 주어진다. 여기서 Y_0 는 자유공간의 고유 어드미턴스이고 D 는 빗방울 지름 ($D=2a$)이다. $N(D)$ 는 빗방울 크기 분포함수로 dD 와 곱하여 단위체적당 빗방울의 개수를 나타내며 $A = \int_0^\infty \sigma_i(D)N(D)dD$ (Nepers/m)이다. 미분방정식을 풀면 아래의 식(9)을 얻고 A 는 일반적으로 z 의 함수이다. 특정한 거리 z 내에서 $A(z)$ 이 일정하다고 가정하면 ($A(z)=A$) 아래와 같이 된다.

$$P(z) = P(0) e^{-\int_0^z A(z)dz} = P(0) e^{-Az} \quad (9)$$

이 식에서 거리 $z = 1000$ m로 하고 데시벨로 표시하면 specific attenuation(dB/km)을 얻을 수 있

다.^[3]

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{P(z)}{P(0)} = e^{-Az} = \frac{P(1000)}{P(0)} = e^{-1000A} \\ \alpha \text{ (dB/km)} &= -10 \log_{10} (e^{-1000A}) \\ &= 10^4 A \log_{10} e = 4.343 \times 10^3 A \\ &= 4.343 \times 10^3 \int_0^\infty \sigma_e \\ &\quad \cdot (D)N(D)dD \text{ (dB/Km)} \end{aligned} \quad (10)$$

2-3 빗방울 크기분포

빗방울 크기분포는 현재까지 많은 기후지역에서의 측정을 통한 실험식으로 많이 제시되었다. 이러한 분포에 근거한 강우감쇠 결과들은 40 GHz이하의 대역에선 거의 일치하나 그 이상의 주파수 대역에서는 서로 차이를 보인다. 따라서 향후에 무선통신 주파수대역이 점차 상향될 것을 감안할 때 국내환경에 맞는 빗방울 크기분포를 이론적, 실험적으로 도출해 내야 한다. 빗방울 크기분포는 음지수 형태로 주어지는 대륙성 기후에서 측정된 L-P분포나 이것을 바탕으로 한 M-P분포, Switzerland, Locarno에서 행한 1년동안의 측정을 통해서 얻어진 Joss 분포, 일본의 도쿄 부근에서 측정된 J-M(Ihara) 분포, 감마분포 등이 제시되었는데 아래에서 주어지는 것(식 (11), (12))과 같이 주로 지수함수나 감마함수형태를 취한다.^[4]

$$N(D) = N_0 e^{-A_1 D} (mm^{-1} m^{-3}) \quad (11)$$

$$N(D) = A_1 D^n e^{-A_2 D} (mm^{-1} m^{-3}) \quad (12)$$

일반감마분포 식 (12)는 $n=0$ 일 때 일반 지수분포 식 (11)이 된다. 다음의 표 1에서 지금까지 잘 알려진 몇 가지의 빗방울 크기분포를 정리하였다. Joss의 세 가지 크기분포는 강우의 형태에 따라 크기분포의 차이가 많음을 보여준다. 대륙성 기후에서 Joss-wide spread는 M-P 분포와 유사하며, L-P분포를 바탕으로 한 음지수 함수인 M-P는 대체로 1.5 mm 이하의 빗방울의 분포를 매우 크게 하는 특징이 있다. 그림 5는 강우율 $R=100$ mm/hr 인 경우에서 여러 가지 분포함수를 그린 것이다.

빗방울의 낙하 종단속도는 대기압, 습도, 온도에

표 1. 빗방울 크기분포별 파라미터 값

Table 1. Parameter value according to distribution of rain size.

크기분포	n	$\Lambda_2 = \alpha R^{-\beta}$	N_0 또는 Λ_1
M-P	$n=0$	$4.1 R^{-0.21}$	8000
Joss	thunder storm	$3.0 R^{-0.21}$	1400
	wide spread	$4.1 R^{-0.21}$	7000
	drizzle	$5.7 R^{-0.21}$	30000
Gamma [5]	$n=2$	$7.09 R^{-0.27}$	$6.45 \times 10^4 R^{-0.5}$
J-M(Ihara)	$n=0$	$5.11 R^{-0.253}$	$1.73 \times 10^4 R^{-0.16}$

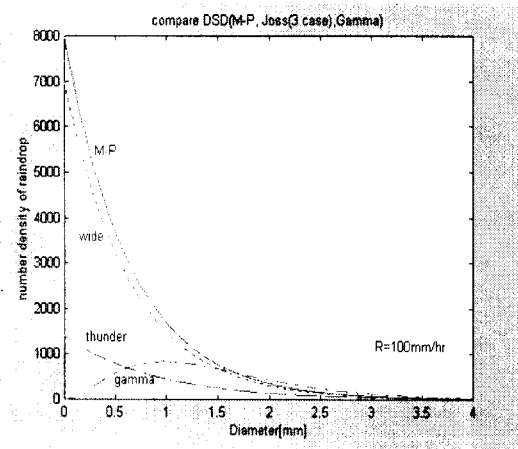


그림 5. 빗방울 크기분포($R=100$ mm/hr)
Fig. 5. Distribution of rain drop size($R=100$ mm/hr).

의해서 결정된다. 1949년 Gunn-Kinzer에 의해서 빗방울의 공기 중에서의 낙하속도는 빗방울의 크기와 상관관계가 있음이 알려졌고, 크기별로 3단계로 나누어 선형그래프로 제시되었는데 아래와 같이 하나의 근사식 식 (13)으로 흔히 사용된다(그림 6).

$$v(D) = 9.65 - 10.30 e^{-0.6D} + 0.65 e^{-7D} \quad (m/s) \quad (13)$$

빗방울 크기분포와 강우율은 서로의 함수이어서 빗방울의 낙하속도(종단속도)를 안다고 가정할 때

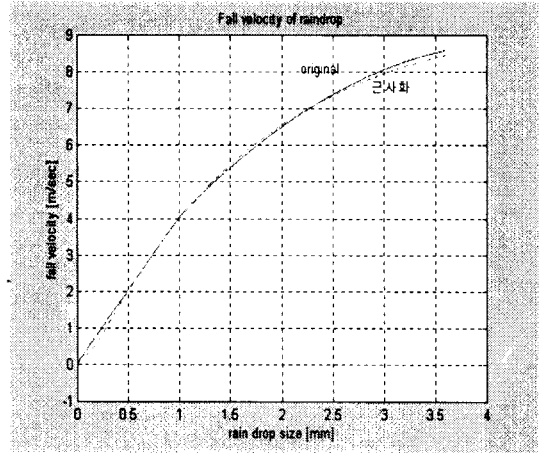


그림 6. 근사화시킨 빗방울 종단속도
Fig. 6. Approximate velocity of rain drop.

서로간에 모순이 있으면 안된다. 따라서 빗방울의 크기분포와 강우율은 아래식 식 (14)를 만족하도록 정규화되어야 한다.

$$R = \int_0^{\infty} \frac{4}{3} \pi \left(\frac{D}{2}\right)^3 N(D)v(D)dD$$

$$\left[\frac{mm^3}{m^3} \frac{m}{sec} 3600 \frac{sec}{hr} \right]$$

$$= 6\pi \times 10^{-4} \int_0^{\infty} v(D) D^3 \cdot N(D)dD (mm/hr) \quad (14)$$

위 식에서 $v(D)$ 는 빗방울의 종단속도이고, $N(D)$ 는 빗방울의 크기분포를 나타낸다. 식 (14)에 식 (12)를 대입하여 적분하면 Λ_1 와 $\Lambda_2 (= \alpha R^{-\beta})$ 는 주어진 강우율 R 에 대해서 다음 식 (15)를 만족해야함을 알 수 있다.

$$\Lambda_1 = \frac{10^4 R}{6\pi \times 10^{-4} (n+4) \left[\frac{9.65}{\Lambda_2^{n+4}} - \frac{10.3}{(\Lambda_2 + 0.6)^{n+4}} + \frac{0.65}{(\Lambda_2 + 7)^{n+4}} \right]} \quad (15)$$

빗방울의 크기에 대하여 적분을 할 경우, 그 크기가 반경 4 mm를 넘으면 유체역학적으로 불안정하게 되어 더 작은 입자로 나누어지므로 반경 4 mm 이상을 주지 않아도 된다. 실제 150 mm/hr 이하의 강우에서 최대직경이 8 mm를 넘지 못하는 것이 측정되었다. 단 빗방울의 크기분포는 지표면 근처에서 측정된 것을 근거로 하므로 전체 강우공간에 대해서

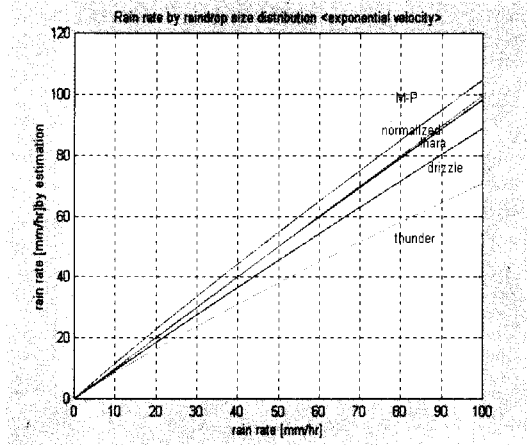


그림 7. 빗방울 크기분포의 검증
Fig. 7. Verification of distributions of rain size.

도 같은 분포를 갖는다고 할 수는 없다. 그러나 같다는 가정 하에 식 (15)를 이용하여 여러 가지 크기분포를 검증한 결과를 그림 7에 나타내었다.

그림 7에서의 검증결과를 비교할 때 M-P와 J-M (Ihara)는 비교적 근사한 결과를 보이고 있으며 정규화된 감마분포식은 정확한 검증결과를 보임을 알 수 있다. Joss-drizzle, thunder는 정규화에 대한 고려가 더 필요한 것으로 보인다. 주어진 강우율 R 에 대해서 크기분포를 결정하는 주요 파라미터는 α , β , Δ_1 , n 이 있는데, 식 (15)를 만족하여야 한다. 이것

표 2. 각 크기분포의 α , β 값 비교
Table 2. Comparison of α , β value according to each distribution of size.

크기분포 \ Parameter	α	β	
M-P	4.1	0.21	
Joss	Wide spread	4.1	0.21
	Thunder storm	3.0	0.21
	Drizzle	5.7	0.21
J-M(Ihara)	5.11	0.253	
Gamma($n=2$)	7.09	0.27	
캐나다[5]	7.3	0.375	
영국[5]	7.3	0.375	

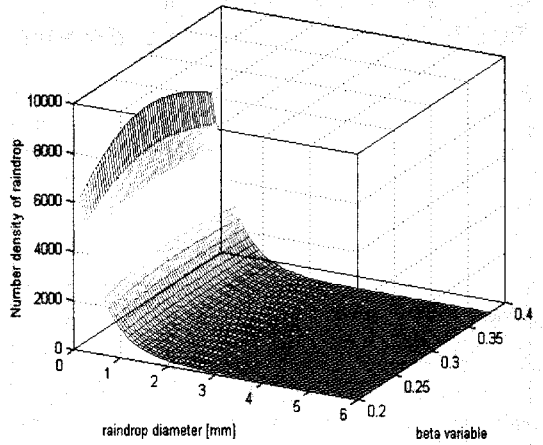


그림 8. β 의 변화에 따른 크기 분포 변화 ($n=0, R=30$ mm/hr)
Fig. 8. Distribution of rain size according to variation of β ($n=0, R=30$ mm/hr).

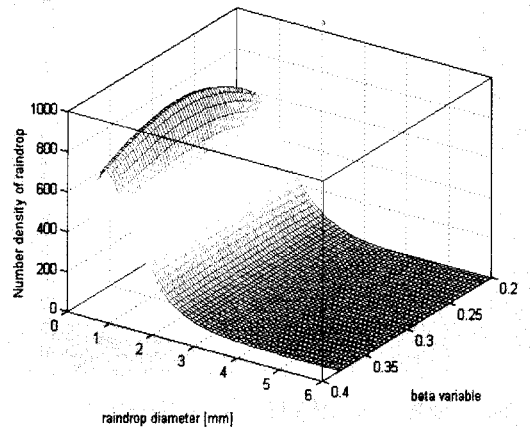


그림 9. β 의 변화에 따른 크기 분포 변화 ($n=1, R=30$ mm/hr)
Fig. 9. Distribution of rain size according to variation of β ($n=1, R=30$ mm/hr).

은 네 개의 파라미터 중 세 개가 독립적으로 주어지면 나머지 하나가 종속적으로 결정된다는 것을 의미한다. 국내외에서 발표된 여러 가지 크기분포(표 2)에 의하면, α 와 β 는 그 변화폭이 특정 범위 내에 있음이 추정 가능하다.

표 2의 Gamma 분포의 차수는 $n=2$ 로 제시되어 있으나 이는 국지적인 측정결과에 따른 매우 이례적

인 경우이다. 나머지 경우는 $n=0$ 의 값을 가지고 있는 지수분포이다. 표 2에서 볼 수 있듯이 α 와 β 의 관계의 대부분의 경우 $\alpha \cong 20\beta$ 로 제시되고 있고, β 의 범위는 대략 $0.2 \leq \beta \leq 0.4$ 정도이다.

그림 8은 강우율 30 mm/hr에서 $\alpha \cong 20\beta$ 와 $n=0$ 로 놓고 $0.2 \leq \beta \leq 0.4$ 의 범위에서 빗방울 크기 분포를 그린 것이며, 그림 9는 같은 조건에 $n=1$ 인 경우의 크기분포를 그린 것이다.

2-4 빗방울의 유전률

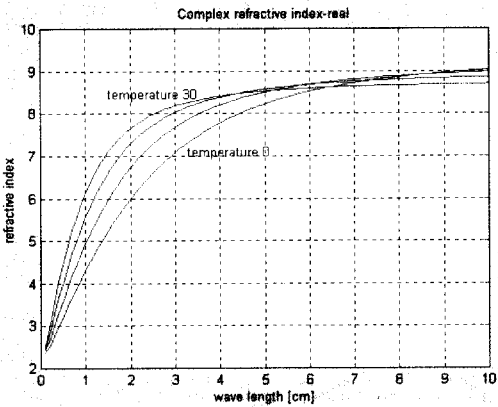


그림 10. 파장에 따른 복소유전율 (실수부)
Fig. 10. Complex refractive index(Real part) as a function of wavelength.

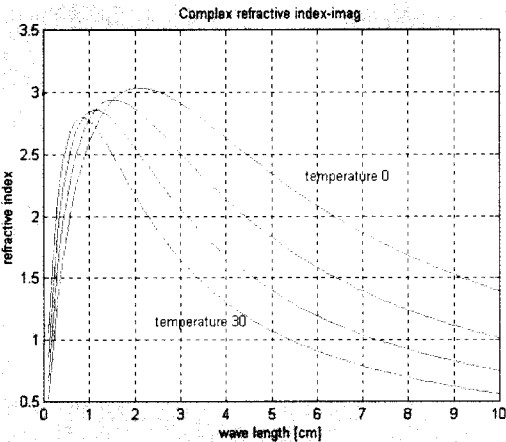


그림 11. 파장에 따른 복소유전율 (허수부)
Fig. 11. Complex refractive index(Imaginary part) as a function of wavelength.

빗방울에 의한 전자파의 소거단면적을 구하기 위해서는 빗방울의 유전율 데이터가 필요하다. 그림 10과 11은 문헌 [6]에서 제시된 식을 이용하여 상온 0°C부터 30°C까지 10°C씩 변화시키며 refractive index를 실수부분과 허수부분으로 나누어 각각을 파장의 함수로 나타낸 것이다.

다음 절에서의 모든 강우감쇠 계산에는 그림 10과 11의 complex refractive index가 사용된다.

2-5 파라미터 변화에 따른 specific attenuation의 변화

본 절에서는 β 와 강우율 R 의 함수로 식 (10)으로 주어지는 specific attenuation을 3차원 그래프로 나타내었다. β 의 범위는 0.2에서 0.4까지 제한하였으며, 강우율 R 의 범위는 40(mm/hr)에서 100(mm/hr)까지로 하였다. 이러한 계산에 있어서 빗방울 크기분포는 각 강우율에 대해서 정규화된 감마분포를 사용하였다. 그림 12와 13은 주파수 50 GHz에서 β 와 R 의 변화에 따른 specific attenuation을 본 것이다. $n=1$ 인 크기분포가 $n=0$ 인 크기분포에 비해 상대적으로 specific attenuation이 적게 나타나고 있으며 각 크기분포에 있어서 강우율 40 mm/hr이하에서는 β 에 따른 차이가 미미한 것을 알 수 있다.

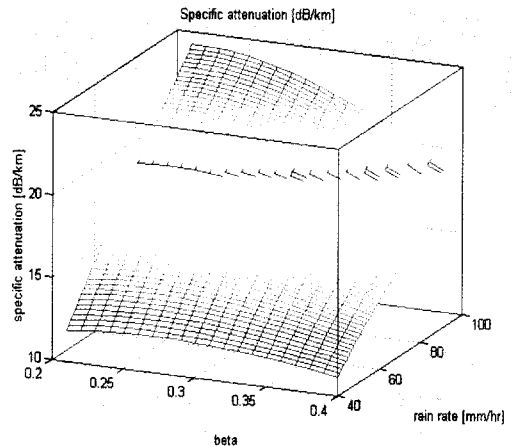


그림 12. β 와 R 의 변화에 따른 강우감쇠
($n=1$, 50 GHz, $40 \leq R \leq 100$)
Fig. 12. rain attenuation as a function of β and R
($n=1$, 50 GHz, $40 \leq R \leq 100$)

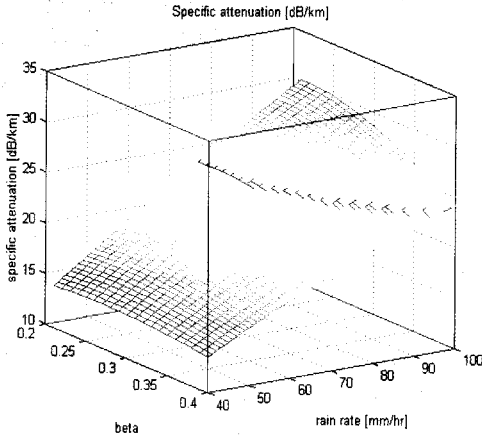


그림 13. β 와 R 의 변화에 따른 강우감쇠
($n=0$, 50 GHz, $40 \leq R \leq 100$)

Fig. 13. Rain attenuation as a function of β and R .
($n=0$, 50 GHz, $40 \leq R \leq 100$)

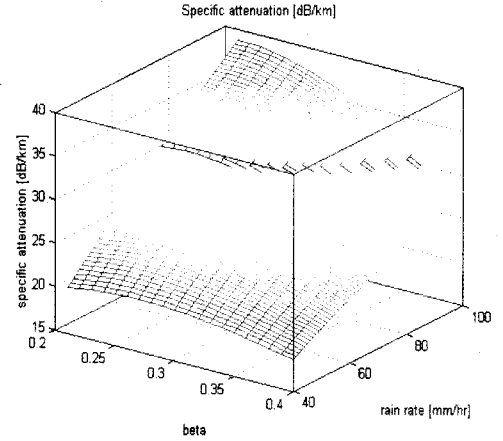


그림 15. β 와 R 의 변화에 따른 강우감쇠
($n=0$, 100 GHz, $R=40 \sim 100$ mm/hr)

Fig. 15. Rain attenuation as a function of β and R .
($n=0$, 100 GHz, $R=40 \sim 100$ mm/hr)

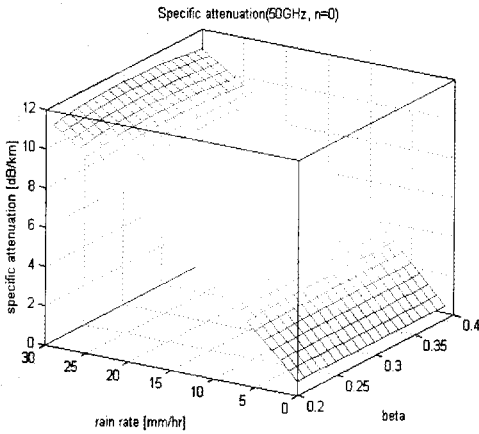


그림 14. β 와 R 의 변화에 따른 강우감쇠
($n=0$, 50 GHz, $R=0 \sim 30$ mm/hr)

Fig. 14. Rain attenuation as a function of β and R .
($n=0$, 50 GHz, $R=0 \sim 30$ mm/hr)

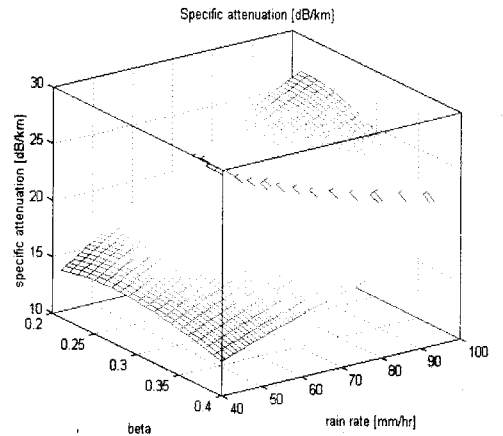


그림 16. β 와 R 의 변화에 따른 강우감쇠
($n=1$, 100 GHz, $R=40 \sim 100$ mm/hr)

Fig. 16. Rain attenuation as a function of β and R .
($n=1$, 100 GHz, $R=40 \sim 100$ mm/hr)

그림 14에서는 강우율 30 mm/h 까지 β 와 R 에 대한 강우감쇠를 나타내었다. 이미 언급한 바와 같이 주파수 50 GHz에서 β 에 따른 강우감쇠 변화가 강우율 40 mm/hr 이하에선 거의 같은 것을 볼 수 있다.

그림 15와 16은 같은 조건에 주파수 100 GHz에서 specific attenuation을 나타낸 것이다. 높은 강우율

에서는 그림 12와 13에서 보다 β 에 따른 더 큰 차이를 보이고 있다. $n=0$ 인 크기분포에 비하여 $n=1$ 인 크기분포의 강우감쇠정도가 약하게 나타나고 있으며 β 의 변화에 따른 차이가 주파수가 커질수록 더 커지고 있음을 보여준다. 위의 모든 그림은 상온 25°C에서의 감쇠치이며 n 값의 변화는 주로 0, 1사이의 분포를 이용하며 여기서 나타내지는 않았지만 n 이

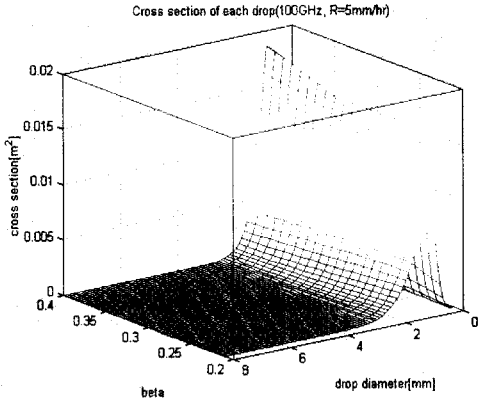


그림 17. β 의 변화에 따른 각 빗방울에서의 소거단면적 분포(100 GHz, $n=0$, $R=5$ mm/hr)

Fig. 17. Distribution of cross section of rainfall as a function of β (100 GHz, $n=0$, $R=5$ mm/hr).

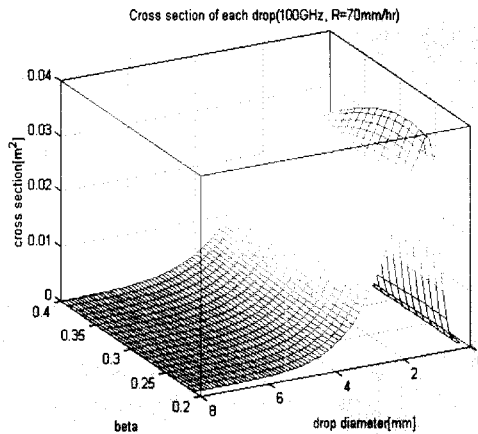


그림 18. β 의 변화에 따른 각 빗방울에서의 소거단면적 분포(100 GHz, $n=0$, $R=70$ mm/hr)

Fig. 18. Distribution of cross section of rainfall related to variation of β (100 GHz, $n=0$, $R=70$ mm/hr).

그보다 커지면 크기분포는 큰 빗방울의 갯수를 과도하게 포함하므로 빗방울의 크기분포로 적절치 않을 것으로 판단된다.

그림 17과 18에서 소거단면적을 나타내기 위해서는 빗방울 직경의 임의의 구간을 적분하여야 하므로 직경 0.1 mm의 간격으로 적분하여 그 구간의 상한값에 소거단면적을 표시하였다. 그림 17에서 보면

직경이 0.5~2 mm인 빗방울에 의한 소거단면적이 가장 크며, 높은 주파수(10 GHz 이상)에서 강우율이 작은(10 mm/hr 이하) 경우에는 β 가 증가함에 따라 이 부분의 소거단면적이 증가하므로 강우감쇠는 증가하게 된다. 반대로 그림 18에서 보이듯이 강우율이 커지면 β 가 작을수록 0.5~2 mm의 소거단면적이 증가하여 강우감쇠는 더 커지게 된다. 상대적으로 낮은 주파수대역에서는 β 의 증가에 따라 강우감쇠가 증가하는 결과를 보였다. β 는 빗방울 크기분포에서 강우감쇠에 가장 큰 영향을 미치는 부분(0.5~3 mm)의 변화 요인이다. 따라서 국내환경에 적합한 강우감쇠를 추정하기 위해서는 여러 파라미터 중 β 의 설정에 매우 신중해야 할 것으로 보여진다. 신뢰성 있는 빗방울 크기분포에 대한 결정은 오랜 시간을 두고 물리적 측정을 거듭함으로써 가능하며, 또는 많은 감쇠계수 실측데이터 축적과 이에 대한 역산란적 분석으로 가능할 것이다.

III. 결 론

Ka-band와 밀리미터파 대역에서의 강우감쇠 추정을 위해서 일반적인 물방울에 주어지는 복소굴절계수를 Mie 산란이론에 적용하여 크기분포에 사용되는 여러 파라미터가 specific attenuation에 미치는 영향을 분석하였다. 이러한 파라미터 분석을 통하여 빗방울 크기분포의 한 요소인 β 의 결정이 매우 중요함을 확인하였으며, 50 GHz와 100 GHz 주파수에서 $0.2 \leq \beta \leq 0.4$ ($a \approx 20\beta$)와 $40 \leq R(\text{mm/hr}) \leq 100$ 범위의 specific attenuation을 계산하고 도시하였다. 강우율 40 mm/hr 이하에서는 β 에 따른 specific attenuation의 변화가 매우 작았고, 40 mm/hr 이상에서는 주파수가 높을수록 β 의 변화에 specific attenuation이 민감하게 변화함을 알 수 있었다. 따라서 국내환경에 적합한 강우감쇠를 추정하기 위해서는 여러 파라미터 중 β 의 결정이 매우 중요하며, 이는 크기분포에 대한 물리적 측정을 오랜 시간 거듭함으로써 가능하며, 또한 많은 감쇠계수 실측데이터 축적과 이에 대한 역추적 분석을 통해 할 수 있다. 본 논문에서 제시된 방법론과 강우감쇠 데이터들은 향후 측정결과에 의해 빗방울 크기분포(특히, β 값)이 결정

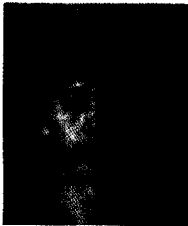
되면 그대로 이용될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

[1] 김양수, 백정기, 이성수, 조삼모, 김혁제 "강우 환경에서의 밀리미터파 전파특성," 한국전자학회 논문지, 제9권 3호, pp. 410-416, 1998.
 [2] Akira Ishimaru, *Electromagnetic Wave Propagation, Radiation, and Scattering*, New Jersey Prentice Hall, 1991.
 [3] R. E. Collin, *Antennas and Radiowave Propagation*, Mcgraw-Hill, 1985.

[4] R. L. Olsen, D. V. Rogers and D. B. Hodge "The aR^b relation in the calculation of rain attenuation," *IEEE Trans. Antennas Propagation*, vol. 26, no. 2, pp. 318-329, 1978.
 [5] Mitra and C. J. Gibbins, "Interference of Raindrop size distributions from Measurements of Rainfall Rate and Attenuation at Infrared Wavelengths," *Radio Science*, vol. 30, no. 4, pp. 931-941, 1995.
 [6] P. S. Ray. "Broadband complex refractive indices of ice and water," *Appl. Opt.*, vol. 11, pp. 1836-1844, Aug., 1972.

김 정 호



1999년 2월: 경희대학교 자연과학대학 우주과학과(이학사)
 1998년 2월: 경희대학교 공과대학 전자공학과(공학사)
 [주 관심분야] 안테나 및 전파전파, 마이크로파 회로

류 규 태



1991년 2월: 경북대학교 공과대학 전자공학과(공학사)
 1993년 2월: 경북대학교 공과대학 전자공학과(공학석사)
 1993년 3월~현재: 한국통신위성사업단 재직
 [주 관심분야] 위성통신, 멀티미디어, 디지털통신 분야

유 명 완



1998년 2월: 호서대학교 정보통신공학과(공학사)
 1998년 3월~현재: 경희대학교 대학원 전자공학과 석사과정
 [주 관심분야] 안테나 및 전파전파, 전자파 산란, 초고주파공학

이 범 선



1982년 2월: 서울대학교 전기공학과(공학사)
 1991년 8월: 미국 네브래스카 주립대 전자공학과(공학석사)
 1995년 5월: 미국 네브래스카 주립대 전자공학과(공학박사)
 1995년 5월~1995년 8월: 네브래스카 주립대 포스트닥(Post Doctor)

김 희 찬

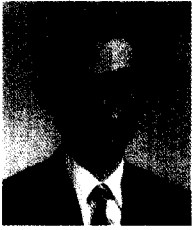


1980년 10월: 경북대학교 공과대학 전자공학과(공학사)
 1987년 12월: 미국 플로리다 공과대학 전자공학과(공학석사)
 1994년 5월: 미국 펜실바니아 주립대학교 전자공학과(공학박사)
 1995년 2월~현재: 한국통신 위성사업단 재직.

1995년 9월~현재: 경희대학교 전자정보학부 부교수
 [주 관심분야] 안테나 및 전파전파, 위성전파 감시, 전자파 산란

[주 관심분야] 디지털 신호처리, 영상 및 음성처리, 멀티미디어통신분야, 위성통신

김 영 수



1981년 2월: 연세대학교 전자공학과(공학사)

1983년 2월: 연세대학교 대학원 전자공학과(공학석사)

1988년 12월: Arizona State University 전기공학과(공학박사)

1985년 5월~1986년 5월: Consultant, signal-system Technology Inc., U.S.A

1986년 6월~1988년 12월: Research Associate, Arizona State University.

1989년 3월~1992년 8월: ETRI 전파기술부 전파응용연구실 실장

1992년 9월~현재: 경희대학교 전자정보학부 부교수
[주 관심분야] 어레이신호처리, 이동통신, 스펙트럼 추정, 적응필터 등

서 덕 영



1980년 2월: 서울대학교 원자핵공학과(공학사)

1985년 6월: Georgia Tech 핵공학과(공학석사)

1990년 6월: Georgia Tech 전자공학과(공학박사)

1990년 6월: Georgia Tech 연구조교

1992년 3월: 상공부 생산기술연구원, HDTV 연구개발단 선임 연구원

1992년 3월~현재: 경희대학교 전자공학과 부교수
[주 관심분야] 의료 영상, MPEG-4, 동영상 전송, ATM