

강우감쇠 유효경로 길이 예측을 위한 경험 모델

An Empirical Model of Effective Path Length for Rain Attenuation Prediction

이주환* · 최용석* · 박동철**

Joo-Hwan Lee* · Yong-Seok Choi* · Dong-Chul Park**

요 약

위성통신 경로의 강우감쇠량을 예측하기 위하여 국제적으로 여러 가지 예측 모델들이 개발 운용되고 있다. 이러한 예측 모델들은 대부분 미국과 유럽을 비롯한 위성 선진국에서 개발한 것으로 국내의 강우환경을 고려하여 개발된 모델은 없는 실정이다.

본 논문에서는 한국전자통신연구원에서 측정한 강우환경 및 강우감쇠 데이터를 이용하여, 국내 위성통신망에서 고려할 수 있는 강우감쇠량 예측 방법에 대해 기술하였다. 특히, 기존 예측 모델들이 적용한 강우경로의 수평적 변화를 고려한 유효경로 길이 예측 기법에서 탈피하여, 위성통신망에서 필연적으로 고려하여야 할 강우경로의 수직적 변화까지도 고려한 유효경로 예측 기법을 유도하고 이를 제안하였다.

본 논문에서 제안한 예측 기법은 국내 강우환경에 적합한 예측 기법으로써, 향후 설계 및 운용될 10 GHz 이상의 국내 위성 및 무선통신시스템에 매우 효율적으로 활용할 수 있을 것이다.

Abstract

The engineering of satellite communication systems at frequencies above 10 GHz requires a method for estimating rain-caused outage probabilities on the earth-satellite path. A procedure for predicting a rain attenuation distribution from a point rainfall rate distribution is, therefore, needed.

In order to predict rain attenuation on the satellite link, several prediction models such as ITU-R, Global, SAM, DAH model, have been developed and used at a global basis. However, since these models have been developed under a particular propagation condition, they may not be appropriate to a propagation condition in Korean territory.

In this paper, a new rain attenuation prediction method appropriate to a propagation condition in Korea is introduced. Based on the results from ETRI measurements, a new method has been derived for an empirical approach with an identification of the horizontal correction factor as in current ITU-R method, and the vertical correction factor has been suggested with decreasing power law as a function of rainfall rate. This proposed model uses the entire rainfall rate distribution as input to the model, while the ITU-R and DAH model approaches only use a single 0.01% annual rainfall rate and assume that the attenuation at other probability levels can be determined from that single point distribution.

This new model was compared with several world-wide prediction models. Based on the analysis, we can easily know the importance of the model choice to predict rain attenuation for a particular location in the radio communication system design.

* 한국전자통신연구원 무선방송기술연구소(Radio Broadcasting Technology Lab., ETRI)

** 충남대학교 전자공학과(Dept. of Radio Science and Engineering, Chungnam National University)

· 논문 번호 : 20000311-031

· 수정완료일자 : 2000년 5월 29일

I. 서 론

10 GHz 이상의 주파수 대역을 이용하는 위성통신망의 효율적인 설계 및 운용을 위하여, 1960년대 초반부터 미국을 비롯한 유럽 각국 및 일본 등의 위성 선진국에서는 자체적으로 강우감쇠량을 예측할 수 있는 모델을 개발하였다^{[1]-[5]}. 그러나, 강우는 시간 및 공간적으로 다양한 특성을 가지므로 국내 고유의 강우환경에서 나타나는 강우감쇠 특성은 이러한 모델에 의한 예측 결과와는 다르게 나타날 수 있다. 그러므로 기존에 개발된 국제 예측 모델들을 국내 위성통신망에 직접 적용하기에는 어려운 현실이다.

한국전자통신연구원(이하 ETRI)에서는 1997년부터 국내 강우환경 연구를 위하여, 무궁화 통신위성망을 대상으로 강우감쇠 및 강우환경 측정시스템을 구축, 운용하고 있다^[6]. 그 결과 현재까지 약 2년여에 걸친 측정데이터가 수집되었고, 1차년도 수집 데이터에 대해서는 분석이 완료된 시점에 있다.

본 논문에서는 1차년도 측정데이터를 이용하여 국내 강우환경에 적합한 강우감쇠 유효경로 길이 예측 모델을 유도하고, 이를 앞서 게재한 논문^[7]에서 소개한 강우감쇠 특성과 조합하여 국내 강우감쇠 예측을 위한 예측 모델로 제안하고자 한다.

제안된 모델은 국내의 측정 데이터를 그대로 반영한 것이므로, 국내 환경에서는 기존 모델들보다 예측의 정확도가 뛰어나 수 밖에 없고, 실제로 제안된 모델을 적용하여 기존 모델들의 예측 결과와 비교해 본 결과 국내 환경에서는 가장 정확한 값을 평가하고 있음을 확인하였다. 따라서 본 모델을 이용하여 보다 높은 신뢰도를 갖는 국내 위성망의 설계 및 운용이 가능할 것으로 전망된다.

II. 강우감쇠 특성 예측

강우에 의한 전자파 신호의 감쇠량을 정량적으로 평가하기 위하여, 국제적으로 많은 연구들이 진행되어 왔다. 특히, Olsen 등은 주파수 및 편파 의존 상수 a 와 b 를 전자파 산란이론으로 유도하여^[8], 강우감쇠량을 아래와 같은 단순한 식으로 예측할 수 있음을 제안하였다.

$$A = \gamma L_{eff} = aR^b L_{eff} \text{ (dB)} \quad (1)$$

이것은 상수 a 와 b 의 값을 알 때, 강우강도(R , mm/hr)와 유효경로 길이(L_{eff} , km)로써 강우감쇠량을 평가할 수 있음을 의미한다. 위의 식에서 γ (dB/km)는 감쇠계수(specific attenuation)라 불리우는 것으로 단위 거리당 강우감쇠량을 나타내며, L_{eff} 는 실제 경로길이가 아닌 강우에 의해 영향을 받는 가상의 경로길이를 나타낸다.

2-1 감쇠계수

감쇠계수는 주파수, 편파, 강우의 지역적 요소(예를 들면, 강우 입자의 크기 및 형상, 낙하 속도, 강우 시 온도 등)에 의존하며, [7]에서 기술된 것과 같이 전자파 산란이론에 기초하여 유도될 수 있다.

감쇠계수 평가에서 특히 관심이 되는 부분은 강우의 크기에 따른 밀도 함수와 낙하시 강우의 형상을 어떻게 모델링할 것인가 하는 것이다. [7]에서는 국내 환경에 대해 밀리미터파 대역까지 적용시킬 수 있는 밀도 분포 모델[9]과 Pruppacher-Pitter의 강우형상 모델^[10]을 적용하여 감쇠계수를 제시하였다. 그림 1은 감쇠계수 예측 절차를 간단하게 나타낸 것이다.

2-2 강우강도 분포

강우강도는 순간적으로 내리는 비의 세기를 정량적으로 나타내는 지수로써, 통상 그 단위로는 시간

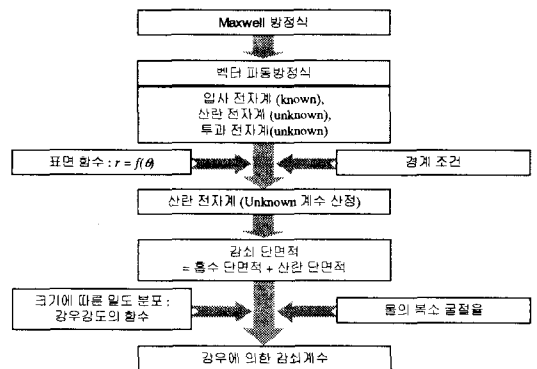


그림 1. 감쇠계수 예측 절차
Fig. 1. Procedure for specific attenuation prediction.

당 강우량으로 나타내고 있다. 예를 들어, 5분간 내린 강우량이 5 mm 였다면 강우의 세기는 한시간 동안 동일한 세기로 내린 것으로 가정한 60 mm/hr의 강도를 갖게 된다. 따라서 강우강도는 그 누적 시간 단위를 어떻게 취하느냐에 따라 그 값의 차이가 크게 나타난다. 일반적으로 강우감쇠량 예측에 적용되는 강우강도의 누적 시간은 1분으로 권고되고 있으며^[11], 따라서 국내 강우강도 분포의 예측에도 이와 동일한 누적 시간 데이터가 주어져야 할 것이다.

2.3 강우감쇠 유효경로 길이

경로상의 강우 구조가 균일하다면 식 (1)로 주어진 강우감쇠량은 감쇠계수(dB/km)에 실제 경로길이 L(km)을 곱한 형태로 제시되어야 한다. 그러나 실제 강우는 지역적, 시간적으로 온도나 바람 등에 의한 변동 요인이 많으며, 이러한 요인들은 지표면에서 대기층 공간으로 형성되는 위성통신 경로에 대해 심각하게 작용할 수 있다. 즉, 강우는 전파 경로의 수직 및 수평적 위치에 따라 온도 분포나 크기, 형상 등이 달라질 수 있고, 강우감쇠의 가장 주된 예측 파라미터인 강우강도 또한 달라질 수 있다. 더욱이 시스템 설계자는 임의의 한 지점(예를 들어, 수신 혹은 송신 지구국)의 강우 정보로부터 강우감쇠량을 예측할 수 있도록 기대하고 있으나, 실제 전송신호는 전체 강우경로상의 강우의 지리적인 특성 분포에 의해 영향을 받게 된다.

따라서, 특정 지점에 대한 강우 정보를 이용하여 경로 전체에 걸친 강우감쇠량을 예측하기 위해서는 그 지점에 대한 강우 정보를 단일화 할 수 있는 가상의 새로운 경로를 설정해야 한다. 이것이 유효 경로의 기본 개념이며, 지금까지 제시된 모든 강우감쇠량 예측 모델에서는 이를 강우강도의 함수로써 제안하고 있다.

임의의 지역에 대한 유효경로 길이를 예측하기 위한 이론적 해석은 거의 불가능하다고 판단되며, 그 지역에 대한 장기간(일반적으로 연속 3년 이상)의 측정데이터를 이용한 실험적 접근이 가장 보편화된 방법이다^[12].

국제적으로 널리 알려진 DAH^[12], SAM^[13], Global^[14] 모델 등은 모두 특정 지역의 측정데이터를 이용하여

독자적인 강우감쇠 유효경로 길이 예측 방법을 경험적으로 유도한 것이며, ITU-R 예측 모델^[11]은 이와 같이 국가별 혹은 지역별로 제안된 유효경로 길이 예측 방법 중 ITU 데이터베이스에 등재된 강우감쇠 특성에 가장 잘 맞는 예측 방법을 권고하는 모델이다.

이러한 예측 모델들 중 전세계적으로 가장 널리 이용되고 있는 ITU-R 예측 모델에서는 그림 2의 구조에 대한 유효경로 길이를 식 (2)와 같이 고려하고 있다.

$$L_{eff} = L_s \cdot \frac{1}{1 + L_h/L_o} = \frac{L_s}{1 + L_h/(35R^{-0.015})} \quad (2)$$

(km)

이때의 r 은 실제 경사경로에 대한 보정계수(reduction factor)이고, R 은 지구국 위치에서의 기준 시간율(0.01%)에 대한 강우강도(mm/hr) 값이다. L_o 는 특성 길이(characteristic length)로 불리며 강우감쇠 측정데이터로부터 경험적으로 유도되었다.

그러나, 식 (2)는 경사경로에 대한 보정계수(r)가 수평경로와 강우강도의 함수만으로 주어지고, 수평경로 성분만이 고려되는 지상 경로의 강우감쇠 예측^[15]에도 동일한 식을 적용하고 있을 뿐 아니라, 초기 ITU-R(당시 CCIR) 예측 모델^[16]이 지상 경로에 대한 측정데이터에서 유도된 Moupfouma 예측 모델^[17]을 적용하였기 때문에, 식 (2)에 주어진 유효경로 길이는 강우의 수평적 특성만을 고려한 유효경로 길이 특성으로 판단할 수 있다.

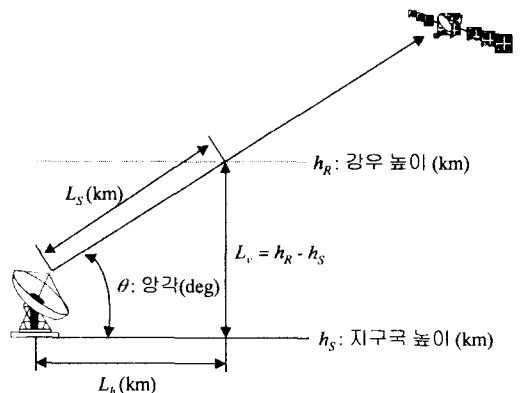


그림 2. 강우감쇠 경로 구조
Fig. 2. Structure of rain attenuation path.

III. 국내 환경에 대한 유효경로 길이 추정

ETRI에서는 국내 강우환경에 대한 위성통신 경로의 신호감쇠 특성을 실측하기 위하여, 대전 대덕연구단지 내에 위치한 ETRI 내에 1997년부터 무궁화 위성 비콘을 이용한 강우감쇠 측정시스템^[18]을 구축, 운용하고 있다. 지리적으로 국내의 중부 지역에 대해 측정을 시도하였기 때문에, 이 시스템으로부터 수집되는 강우감쇠 특성은 국내 강우감쇠의 대표 특성이라고 간주할 수 있을 것이다. 본 시스템을 이용하여 1차년도 측정 기간에 해당하는 1997년 7월1일부터 1998년 6월 30일까지의 1년간 측정 결과로부터 아래와 같이 강우감쇠 특성을 이끌어 내었고, 국내 위성통신 경로의 강우감쇠 유효경로 길이 특성을 유도하였다.

3-1 측정 결과

1997년 7월 1일부터 1998년 6월 30일까지의 기간에 대해, 12.25 GHz의 무궁화 위성 경로에 대한 대전 지역 강우감쇠 및 강우강도 특성을 통계적으로 처리하였다.

이 때의 데이터 처리에는 강우강도 및 감쇠량 측정 장비가 동시에 가동된 시간에 대해서만 수행하였으며, 둘 중 어느 하나라도 중단된 기간에 대한 측정 데이터는 모두 제거하였다. 두 데이터의 수집 기간이 다르면 동일한 강우환경 하에서 측정된 데이터로 간주하기 어렵기 때문이다.

ETRI 측정시스템 자체의 불가동 시간을 제외한 강우강도 및 강우감쇠 측정 분포를 그림 3에 나타내었다.

그림 3을 이용하여 동일 시간을 대비 강우강도 및 강우감쇠를 대응시키면 그림 4와 같은 강우감쇠의 강우강도 의존 특성을 얻을 수 있다. 이것이 ETRI에서 1년간 측정된 강우감쇠의 실질적인 특성이라 할 수 있을 것이다.

3-2 유효경로 길이 특성

강우환경에 적합한 유효경로 길이 특성을 유도하

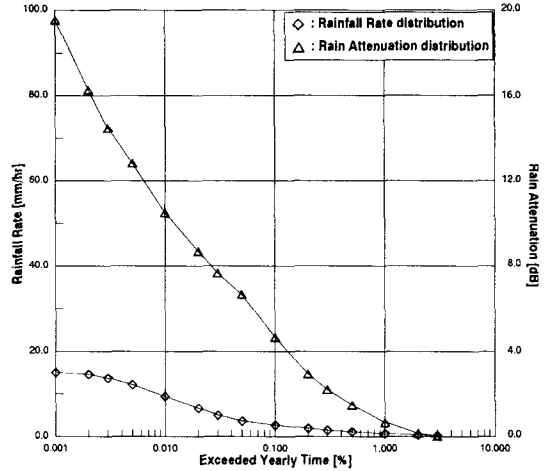


그림 3. 강우강도 강우감쇠 측정 분포 특성
Fig. 3. Observed distributions of rainfall rate and attenuation.

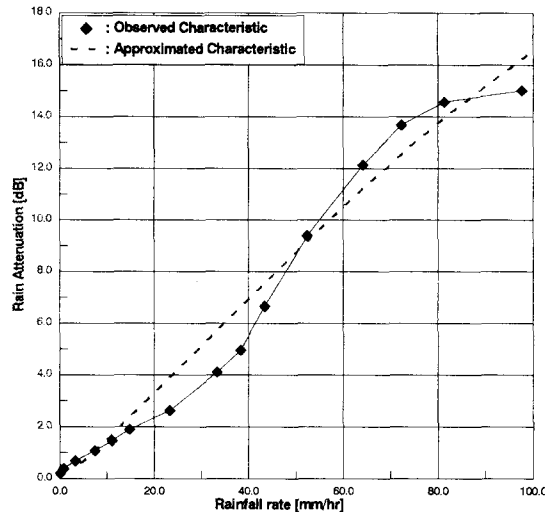


그림 4. 강우감쇠 특성 (12.25 GHz)
Fig. 4. Rain attenuation characteristics at 12.25 GHz.

기 위하여 먼저 ITU-R의 유효경로 특성과 그림 4의 강우감쇠 특성을 이용한 유효경로 특성을 비교하여 보았다. 이것을 그림 5에 나타내었다. 이 때 적용된 감쇠계수는 논문^[7]의 값을 적용하였다.

그림 5에서와 같이, 측정 결과에 근거한 유효경로 특성은 ITU-R 예측 모델에 의한 특성과는 다른 형태로 나타나며, 특히, 강우강도가 매우 큰 영역(약 75 mm/hr 이상)에서는 ITU-R 모델에 의한 특성보다 더 큰 경로 길이가 나타남을 알 수 있다. 이 차이는

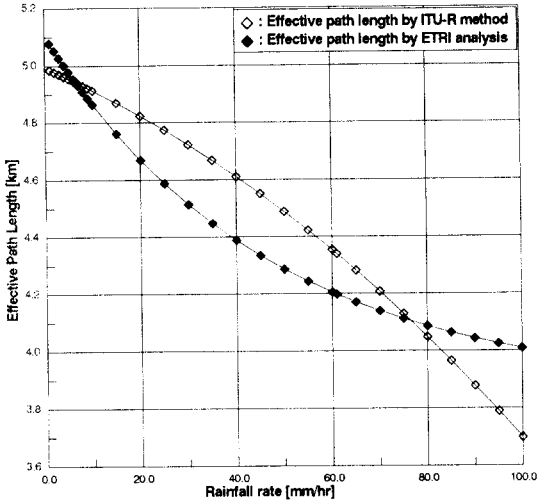


그림 5. 유효경로 길이 특성

Fig. 5. Characteristics of empirical effective path length.

ITU-R 예측 모델이 수평적 강우 구조만을 고려하였기 때문에, 강우의 수평 구조에 지배적인 지상경로에 대해서는 충분한 경로 보정이 이루어지지만, 강우의 수직적인 변동까지도 고려해야 하는 위성 통신 경로에 대해서는 충분한 보정이 이루어지지 않았기 때문에 발생하는 결과로 판단할 수 있다. 최근의 ITU-R 회의에서도 위성통신 경로에 대한 강우의 수직적 경로 보정 요소를 추가하고자 하는 노력이 진행되고 있다^{[12][13]}.

ITU-R 예측 모델에서 제시한 유효경로 특성을 식 (3)과 같이 경사경로가 아닌 수평경로에 대한 유효경로 특성으로 간주하면, 그림 5에 주어진 유효경로 길이의 측정 특성으로부터 삼각함수에 의해 수직경로 성분을 찾을 수 있다.

이것은 경사경로를 수평, 수직의 경로성분으로 나누어, 각각의 성분에 대해 강우감쇠에 기여하는 보정계수(adjustment factor)를 적용하여 나타내면 가능해진다.

즉, 경사경로에 대한 유효경로 길이는

$$L_{eff} = L_s \times F_s \quad (\text{km}) \quad (3)$$

로 나타낼 수 있고, 이 때의 계수 F_s 는 경사경로에 대한 보정계수이다.

마찬가지 방법으로, 각 수평 및 수직성분의 보정계수 (F_h, F_v)를 정의하여

$$L_{eh} = L_h \times F_h \quad (4)$$

$$L_{ev} = L_v \times F_v \quad (5)$$

로 표시할 수 있으며, 식 (2)에 의해 수평경로에 대한 유효 길이 (L_{eh})는

$$\begin{aligned} L_{eh} &= \frac{L_h}{1 + L_h / (35e^{-0.015R})} \\ &= \frac{L_h}{1 + 0.02857 \cdot L_h \cdot e^{0.015R}} \quad (\text{km}) \end{aligned} \quad (6)$$

가 된다.

또한 그림 2의 강우감쇠 경로 구조에서

$$L_h = L_s \cdot \cos \theta \quad (7)$$

$$L_v = h_R - h_s = L_s \cdot \sin \theta \quad (8)$$

의 관계가 성립한다.

식 (7)에 $\cos \theta$ 를 곱한 것과 식 (8)에 $\sin \theta$ 를 곱한 것을 합하면

$$\begin{aligned} L_h \cdot \cos \theta + L_v \cdot \sin \theta &= \\ L_s \cdot \cos^2 \theta + L_s \cdot \sin^2 \theta &= L_s \end{aligned} \quad (9)$$

이 성립하게 되고, 여기에 L_s 를 경사경로에 대한 유효경로 길이 L_{eff} 로 대체하고, 수평 및 수직경로에 대해서도 각각의 유효경로 L_{eh} 및 L_{ev} 로 대체하더라도 이 관계는 성립하게 된다. 즉,

$$F_h \cdot L_h \cdot \cos \theta + F_v \cdot L_v \cdot \sin \theta = L_{eff} = F_s \cdot L_s \quad (10)$$

가 된다.

식 (10)에 식 (7) 및 식 (8)을 대입하고 L_s 를 제거하면

$$F_h \cdot \cos^2 \theta + F_v \cdot \sin^2 \theta = F_s \quad (11)$$

의 관계가 성립하며, 이것이 구하고자 하는 수직 및 수평 성분의 상호 관계식이 된다.

식 (11)에 의해 구하고자 하는 값은 수직경로 보정계수인 F_v 이며, 이것은 그림 5의 경사경로에 대한 유효경로 특성과 식 (6)에서 주어진 수평 유효경로 특성 관계를 적용하게 되면, 60 mm/hr 이하의 강우강도 범위에서는

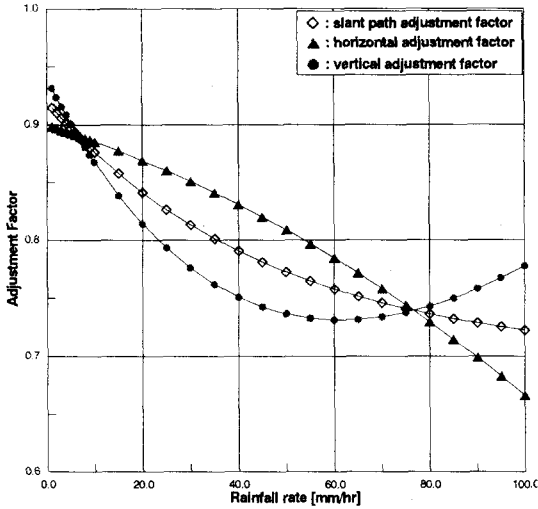


그림 6. 수평 및 수직 보정계수 특성
Fig. 6. Horizontal and vertical adjustment factor.

$$F_v = 0.703 + 0.24e^{-0.039R} \quad (12a)$$

인 강우강도 R 에 따라 단조 감소하는 함수와 그 이상의 범위에서는

$$F_v = 0.714 + 0.013e^{+0.04(R-60)} \quad (12b)$$

인 단조증가 함수를 얻는다.

그림 6은 국내 강우감쇠 측정데이터로부터 유도된 보정계수의 경험적 특성을 나타낸 것이다. 경사 경로에 대한 보정계수(slant path adjustment factor) 특성과 ITU-R 모델을 인용한 수평 보정계수(horizontal path adjustment factor), 수직적 변동을 포함하는 수직 보정계수(vertical path adjustment factor)를 함께 도시한 것이다.

IV. 유효경로 길이 예측 모델 제안 및 강우 감쇠량 예측 비교

4-1 제안 모델

본 논문에서는 전술한 분석 결과에 기초하여, 강우감쇠량 예측에 필요한 유효경로 길이 예측 절차를 다음과 같이 제안한다.

(i) 그림 2의 경로 구조에 대한 강우 경로 길이를 계산한다. 이 때, h_R 은 강우 높이로써 ITU-R 권고서

[7]를 준용한다.

$$L_v = h_R - h_s, \text{ km}$$

$$L_s = L_v / \sin \theta, \text{ km}$$

$$L_h = L_s \cos \theta, \text{ km}$$

(ii) 식 (3)을 이용하여 수평 보정계수 (F_h)를 계산한다.

$$F_h = \frac{1}{1 + 0.02857 \cdot L_h \cdot e^{0.015R}}$$

(iii) 식 (12)로부터 수직 보정계수 (F_v)를 계산한다.

$$F_v = 0.703 + 0.24e^{-0.039R}$$

$R \leq 60 \text{ mm/hr}$ 인 경우

$$F_v = 0.714 + 0.013e^{+0.04(R-60)},$$

$> 60 \text{ mm/hr}$ 인 경우

(iv) 식 (8)을 이용하여 경사경로에 대한 보정계수 (F_s)를 계산한다.

$$F_s = F_h \cdot \cos^2 \theta + F_v \cdot \sin^2 \theta$$

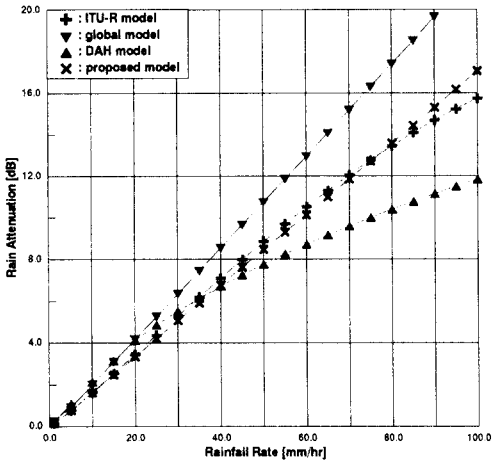
(v) 식 (4)로부터 유효경로 (L_{eff}) 길이를 계산한다.

$$L_{eff} = L_s \times F_s, \text{ km}$$

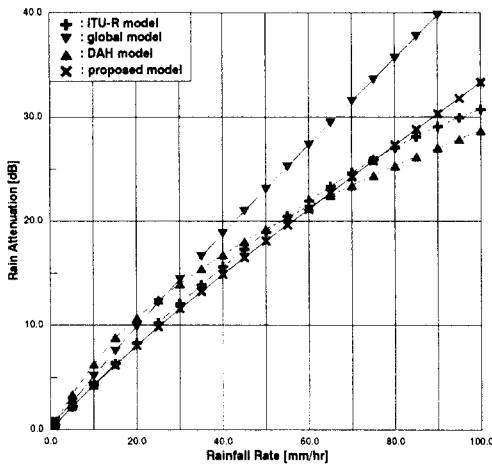
4-2 강우감쇠량 예측

위에서 제안한 유효경로 길이 예측 모델과 기존 모델을 이용하여 위성통신 경로에 대한 강우감쇠량을 예측해 보았다. 이 때, 약 45° 의 앙각을 가지는 무궁화 위성망을 고려하여 수직 편파 신호를 전송하는 경우를 가정하였다. 또한 감쇠계수는 [7]에서 제시한 값을 각 모델별로 동일하게 적용하였으며, Ku-대역 시스템의 대표적인 주파수인 12.25 GHz, Ka-대역인 19.45 GHz, 그리고 밀리미터파 대역(40.0 GHz)에 대하여 고려하였다.

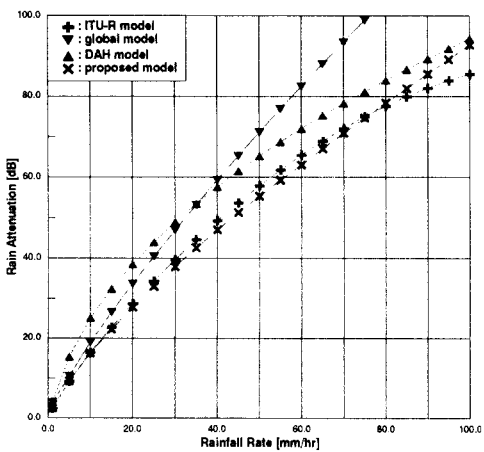
그림 7에서와 같이, 강우강도 분포가 일정하고 고려하는 강우경로가 동일하다고 해도 어떤 모델에 의해 강우감쇠량을 예측하느냐에 따라 그 값이 달라지며, 그 오차 특성은 주파수에 따라 매우 다양하게 나타난다는 사실이다. 본 논문에서 제안한 방법에 의한 강우감쇠 특성(그림에서 'x'로 표시)을 국내 특성으로 간주한다면, 그림 7로부터 국내 강우감쇠 특성은 ITU-R 예측 특성(+)과 유사한 것으로 평가할



(a) 12.25 GHz



(b) 19.45 GHz



(c) 40.0 GHz

그림 7. 강우감쇠 예측 특성

Fig. 7. Prediction results of rain attenuation.

수 있으나, 강우강도의 전 범위에 걸쳐 편차를 보이고 있으며, 특히 80 mm/hr 이상의 높은 강우강도 영역에서는 강우강도에 대한 감쇠량의 증가율이 ITU-R 예측 모델보다 크게 나타남을 알 수 있다. 따라서, 국내 강우감쇠량을 보다 정확히 평가하기 위해서는 국내 강우환경에 가장 적합한 예측 모델이 개발되어야 하며, 강우감쇠의 지역적 특성을 가장 크게 반영하는 강우 유효경로 길이 예측 기법을 본 논문에서는 일차적으로 제안하였다.

V. 결 론

본 논문에서는 위성통신 경로의 강우감쇠 예측 방법에 대해서 분석해 보았다. 기존에 제시된 ITU-R, Global, SAM, DAH 모델 등의 예측 모델들은 국내 환경과는 다른 지역의 측정 데이터에 근거하므로, 국내 환경에 적합한 모델이라 할 수 없을 것이다. 특히, Ka 대역 위성통신 시스템의 도입이 현실화된 시점에서 이러한 국제 예측 모델의 적용에 의한 국내 위성통신망 설계 및 운용은 예측 오차가 Ku 대역에 비해 더 심각하게 나타날 것으로 예상되므로, 이로 인한 시스템 비용 및 안정도 측면에서 막대한 손실을 초래할 수 있다.

본 논문에서는 이러한 강우의 지역적 특성을 감안하여, 국내에서 측정된 강우감쇠 및 강우강도 데이터로부터 강우감쇠의 정량적 평가 특성을 분석하고, 그 결과를 간단한 수식적 예측 모델로 제시하였다. 기존에 여러 국가들에서 제안된 강우감쇠 예측 모델들이 대부분 강우의 수평적 변동 특성만을 고려하는 데 반해, 본 논문에서 제시한 예측 모델은 강우의 수직적 변동 특성도 함께 고려하였다.

본 논문에서 제안한 예측 방법에 대해 앞으로 보다 장기간의 측정데이터를 이용한 검증 및 보완이 이루어진다면 국내 환경에 적합한 강우감쇠 예측 표준모델로서, 향후 설계 및 운용되는 10 GHz 이상의 위성 및 무선통신시스템에 매우 효율적으로 활용될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

[1] K. Morita and I. Higuti, "Statistical studies on rain

- attenuation and site diversity effect on earth to satellite links in microwave and millimeter wavebands," *Transactions of the IEICE of Japan*, vol. E 61, no. 6, pp. 425-432, June, 1978.
- [2] S. H. Lin, H. J. Bergmann, and M.V. Pursley, "Rain attenuation on earth-satellite paths-Summary of 10-year experiments and studies," *Bell System Technical Journal*, vol. 59, no. 2, pp. 183-228, Feb., 1980.
- [3] P. Misme and P. Waldteufel, "A model for attenuation by prediction on a microwave earth-space link," *Radio Science*, vol. 15, no. 3, pp. 655-665, May-June, 1980.
- [4] F. Moupfouma, "Improvement of a rain attenuation prediction method for terrestrial microwave links," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. AP-32, no. 12, pp. 1368-1372, Dec., 1984.
- [5] M. Yamada, Y. Karasawa, M. Yasunaga, and B. Arbesser-Rastburg, "An improved prediction method for rain attenuation in satellite communications operating at 10~20 GHz," *Radio Science*, vol. 22, no. 6, pp. 1053-1062, Nov., 1987.
- [6] Y. S. Choi, J. H. Lee, and J. M. Kim, "Rain attenuation measurements of the Koreasat beacon signal on 12 GHz," *CLIMPARA '98*, Ottawa, Canada, pp. 208-211, Apr., 1997.
- [7] 황정환, 백정기, 김양수, 김영민, 최용석, 이주환, 박세경, "빗방울의 형태에 따른 산란특성 해석 및 강우감쇠 계수 추정," 한국전자과학회 논문지, 10(5), pp. 701-710, 1999. 9.
- [8] R. L. Olsen, D. V. Rogers, and D. B. Hodge, "The aR^b relation in the calculation of rain attenuation," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. AP-26, no. 2, pp. 318-329, Mar., 1978.
- [9] 조삼모, 김양수, 백정기, 이성수, 김혁제, "국내 환경에 적합한 밀리미터파 대역에서의 강우감쇠 추정," 한국통신학회논문지, 제23권, 제7호, pp. 1755-1763, 1998.
- [10] H. R. Pruppacher and R. L. Pitter, "A semi-empirical determination of the shape of clouds and rain drops," *Journal of Atmospheric Science*, vol. 28, no. 1, pp. 86-94, 1970.
- [11] ITU-R, "Propagation data and prediction methods required for the design of earth-space telecommunication systems," *Recommendation ITU-R P. 618-5*, 1997.
- [12] A. Dissanayake, J. Allnutt, and F. Haidara, "A prediction model that combines rain attenuation and other propagation impairments along earth-satellite paths," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 45, no. 10, pp. 1546-1558, Oct., 1997.
- [13] W. L. Stutzman and W. K. Dishman, "A simple model for the estimation of rain-induced attenuation along earth-space paths at millimeter wavelengths," *Radio Science*, vol. 17, no. 6, pp. 1465-1476, Nov.-Dec., 1982.
- [14] R. K. Crane, "Prediction of attenuation by rain," *IEEE Transactions on Communications*, vol. COM-28, no. 9, pp. 1717-1733, Sep., 1980.
- [15] ITU-R, "Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems," *Recommendation ITU-R P. 530-7*, 1997.
- [16] CCIR, "Propagation data required for space telecommunication systems," *CCIR Report 564-2*, ITU, 1982.
- [17] F. Moupfouma, "Improvement of a rain attenuation prediction method for terrestrial microwave links," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. AP-32, no. 12, pp. 1368-1372, Dec., 1984.
- [18] Y. S. Choi, J. H. Lee, and J. M. Kim, "Rain attenuation measurements of the Koreasat beacon signal on 12 GHz," *CLIMPARA '98*, Ottawa, Canada, pp. 208-211, Apr., 1997.

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

최 용 석



1982년: 연세대학교 천문우주학과 (이학사)

1994년: 동경대학교 대학원 전파물리학과 (이학박사)

1983년~1986년: 공군 레이더 분석관 (중위)

1987년 2월~현재: 한국전자통신연구원 무선방송기술연구소 선임연구원

[주 관심분야] 전파전파 특성 예측 모델링, 위성 및 지상 밀리미터파 무선통신

박 동 철



1974년 2월: 서울대학교 공과대학 전자공학과 (공학사)

1976년 2월: 한국과학기술원 전기전자공학과 (공학석사)

1984년 12월: University of California, Santa Barbara (공학박사)

1976년~현재: 충남대학교 공과대

학 전파공학과 교수

1977년~1978년: Ruhr University, Bochum, Germany, 방문교수

1994년~1998년: IEEE MTT Korea Chapter Chairperson

1998년~현재: IEEE EMC Korea Chapter Chairperson

2000년~현재: 한국전자파학회 회장

[주 관심분야] Microwave and millimeter-wave passive devices, EMC/EMI topics, and Antennas.