

Ku대역 무인항공기 데이터 링크 설계를 위한 강우감쇠 분석

이재윤*

Rain Attenuation Analysis for Designing UAV Data Link on Ku-Band

Jaeyoon Lee*

요약

강우에 취약한 특성을 갖는 Ku대역을 이용한 통신 링크 설계 시에는 반드시 정확한 데이터와 정밀한 예측모형을 이용하여 도출한 강우감쇠 값을 반영하여 링크 마진을 분석하여야 한다. 따라서 본 논문에서는 최근 TTA에서 제시한 국내 강우강도 분포를 분석하여 Rec. ITU-R PN.837-1 및 Crane 모델에서의 지역별 강우강도와 비교하고, 우리나라의 최근 강우강도 분포와 유사한 지역을 선택하여 Ku대역 주파수에 대한 해당 지역의 강우감쇠를 Rec. ITU-R P.618-8와 Crane 강우감쇠 예측 모델을 통해 무인항공기와 지상통신장비의 통신 링크 거리 및 연 시간율(%)에 따라 분석한다.

Key Words : Ku-Band, Rain Attenuation, Rainfall Intensity

ABSTRACT

It is necessary to apply an exact data and a precise prediction model for a rain attenuation to design the link margin for a data link using Ku-band with the serious effect by rain. In this paper, we investigate the regional rainfall-rate distribution of Korea proposed in TTA.KO-06.0122/R1 and compare it with the distribution provided by Rec. ITU-R PN.837-1 and Crane. And, the rain rate climate regions similar with the rainfall-rate distribution of Korea in Rec. ITU-R PN.837-1 and Crane model are selected. Finally, using Rec. ITU-R P.618-8 and Crane rain attenuation prediction model, we derive and analyze the rain attenuation for Ku-band frequency according to the time percentage of an average year and the distance of wireless communication link between unmanned aerial vehicle (UAV) and ground data terminal (GDT).

I. 서론

국내 무인항공기(UAV: Unmanned Aerial Vehicle) 산업은 최근 유인기가 기존에 수행하던 단순하고 반복적인 위험한 임무를 대체하는 수단으로 비약적인 발달이 이루어졌으며, 학계, 산업계, 연구소를

중심으로 관련 연구 및 개발이 활발히 진행되고 있다¹⁾. 국내 무인항공기 데이터 링크 시스템 등에 사용되는 Ku대역은 강우로 인한 전파 감쇠가 상당히 크며, 이는 대기 중의 산소와 수증기에 의한 흡수손실과 눈, 우박, 안개, 구름 등의 자연현상에 대한 감쇠에 비해 보다 크고, 공간적, 시간적으로 다양한 감쇠 분포를

* First and Corresponding Author : Korean Intellectual Property Office, jylee1988@gmail.com, 정회원
논문번호 : KICS2015-05-161, Received May 31, 2015; Revised July 9, 2015; Accepted July 9, 2015

갖는다^[8]. 공간적으로 우리나라는 Rec. ITU-R PN.837-1^[9] 기준으로 K-zone에 속하며, 0.01%의 연 시간율 기준으로 42mm/h의 강우강도를 갖고, [10]에서 제시된 강우 기후 지역별 강우강도 분포에 따르면 우리나라는 D2-region에 속하며, 0.01%의 연 시간율 기준으로 46.8mm/h의 강우강도를 갖는다. 이렇듯 강우에 취약한 특성을 갖는 Ku대역을 이용한 통신 링크 설계 시에는 반드시 정확한 데이터와 정밀한 예측모델을 이용하여 도출한 강우감쇠 값을 반영하여 링크 마진을 분석하여야 한다.

현재 많이 사용되고 있는 강우감쇠 예측 모델은 ITU-R에서 권고하고 있는 Rec. ITU-R P.618-5^[11]와 Rec. ITU-R P.618-8^[12]이 있으며, Crane이 제시한 강우감쇠 예측 모델^[10]도 무인항공기의 데이터 링크 설계 시 사용되고 있다. [8]에서는 Rec. ITU-R P.618-5와 P.618-8에서 제시된 모델을 이용하여 Ku대역에 대한 강우감쇠를 분석하였으며, [5]에서는 Rec. ITU-R P.618-8을 이용하여 무인항공기의 고도에 따른 강우감쇠를 분석하였다. 또한 [7]에서는 강우모델로 Crane 강우감쇠 예측 모델^[10]을 적용하여 강우 페이딩 파라미터를 계산하고 8PSK 트래일리스 부호화방식의 BER을 도출하였다.

최근 국내 강우환경은 지구 온난화 및 엘니뇨 현상으로 인한 기후변화로 과거에 비해 집중호우의 발생 빈도가 높아지고 있으며, 연중 강우량 또한 과거보다 지속적으로 증가하고 있다. 이러한 집중호우의 발생 빈도와 강우량은 지역별로 편차가 상당히 심하게 나타나는데, [9]와 [10]에서 제시한 넓은 강우 기후 지역에 대한 강우강도 분포를 적용하여 강우감쇠를 분석하게 되면 이러한 지역별 편차의 특성이 무시되며 정밀한 강우감쇠 예측 모델을 사용하여도 정확한 강우감쇠의 분석이 불가능하다. 국내 정보통신표준화단체인 TTA에서는 최근 13년간(2000~2012)의 강우강도 분포를 조사하여 국내 무선 통신망의 효율적인 설계를 위해 10GHz 이상의 고주파 대역 링크에서 발생하는 강우감쇠량 추정에 사용할 수 있도록 국내 지역별 강우강도 분포를 제시하였다^[13]. 따라서 Ku대역을 이용하여 보다 현실적이고 안정적인 통신 링크를 설계하기 위해서는 최근 [13]에서 제시된 지역별 강우강도 분포와 이미 검증된 예측 모델들^[10-12]을 사용하여 강우감쇠를 분석하여야 한다.

본 논문에서는 [3]에서 제시된 가시선 링크 확보 시 운용 고도와 통신 거리에 대해 [13]에서 제시한 강우강도 분포를 분석하여 [9] 및 [10]에서의 지역별 강우강도와 비교하고, 우리나라의 최근 강우강도 분포와

유사한 지역을 선택하여 Ku대역 주파수에 대한 해당 지역의 강우감쇠를 Rec. ITU-R P.618-8와 Crane 강우감쇠 예측 모델을 통해 무인항공기와 지상통신장비의 통신 링크 거리 및 연 시간율(%)에 따라 분석한다.

II. 강우감쇠 예측 모델

기본적으로 다양한 강우강도에 따른 주파수별 강우감쇠는 강우가 전파경로 상에서 동일할 경우, 이론적, 경험적으로 강우감쇠 계수(γ , dB/km)와 유효 전파경로 길이의 곱으로 나타낼 수 있다^[4]. 그림 1은 지상통신장비(GDT)와 무인항공기(UAV) 경로의 강우감쇠 경로 구조도를 나타내었으며, 본 절에서는 현재 많이 사용되고 있는 강우감쇠 예측 모델인 Rec. ITU-R P.618-8와 Crane 강우감쇠 예측 모델을 설명한다. 표 1에는 그림 1과 두 모델에서 사용되는 주요 파라미터들에 대해 간략하게 정의하였다.

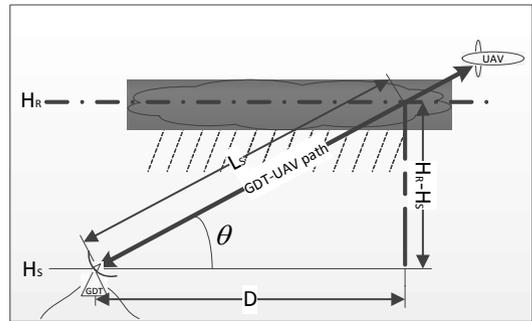


그림 1. 지상통신장비와 무인항공기 경로의 강우감쇠 경로 구조도

Fig. 1. Rain attenuation model of the path between GDT and UAV.

표 1. 파라미터 정의.

Table 1. Parameter definition.

Parameter	Definition
$R_{0.01}$	Rainfall Intensity for the time percentage of 0.01%, mm/h
H_S	GDT height above mean sea level, km
H_R	Mean annual rain height above mean sea level, km
H_0	0°C Isotherm Height, km
θ	Elevation angle, degree
E	Effective earth radius, km
f	Operating frequency, GHz
L_s	Slant path length, km
D	Horizontal projection length, km

2.1 Rec. ITU-R P.618-8^[12]

Rec. ITU-R P.618-8에서 제시한 강우감쇠 예측 모델은 연 시간을 0.01%에 대한 1분 누적 강우강도를 이용하여 계산한 강우감쇠를 기준으로 특정 연 시간을 p%에 대한 강우감쇠를 구하는 것으로써, 모든 강우강도에 대해 동일한 강우 높이를 고려하며, 수평감소인자 및 수직조정인자를 사용하여 예측한다. Rec. ITU-R P.618-8의 강우감쇠 예측은 아래와 같은 단계로 수행된다.

Step 1: 강우 높이(H_R) 결정

우리나라(위도(ϕ)= 38°)의 경우, 강우 높이 H_R 을 결정하기 위해서는 먼저 다음과 같이 0°C 등온선 높이 H_0 를 구한다.

$$H_0 = 5 - 0.075(\phi - 23) \quad (1)$$

그 다음 아래 식 (2)를 이용하여 최종 강우높이를 계산한다^[15].

$$H_R = H_0 + 0.36 \text{ km} \quad (2)$$

Step 2: 경사 경로 길이 L_S 계산

경사 경로 길이 L_S 는 지상통신장비 안테나의 지향각 θ 에 따라 아래와 같이 구할 수 있다.

$$L_S = \begin{cases} \frac{(H_R - H_S)}{\sin\theta} & , \theta \geq 5^\circ \\ \frac{2(H_R - H_S)}{\sqrt{\sin^2\theta + \frac{2(H_R - H_S)}{E}}} + \sin\theta & , \theta < 5^\circ \end{cases} \quad (3)$$

Step 3: 수평 사영 길이 D 계산

다음과 같이 경사 경로 길이에 대한 수평 사영 길이를 구한다.

$$D = L_S \cos\theta \quad (4)$$

Step 4: 연 시간을 0.01%에 대한 강우강도 $R_{0.01}$ 결정

해당 지역의 연 시간을 0.01%에 대한 1분 누적 강우강도를 찾는다.

Step 5: 특정 강우감쇠 계수 γ_R 결정

1~1,000GHz의 주파수 범위에서 통용될 수 있는 강우감쇠 계수 γ_R 는 다음과 같으며,

$$\gamma_R = kR_p^\alpha \quad (5)$$

식 (5)를 이용하여 step 4에서 결정된 $R_{0.01}$ 에 대한 강우감쇠 계수를 아래와 같이 구한다.

$$\gamma_{R_{0.01}} = kR_{0.01}^\alpha \quad (6)$$

여기서 k 와 α 는 주파수와 편파에 따른 계수로 아래 식 (7)와 (8)에서 구할 수 있다.

$$k = [k_H + k_V + (k_H - k_V)\cos^2\theta\cos 2\iota] / 2 \quad (7)$$

$$\alpha = \frac{k_H\alpha_H + k_V\alpha_V + (k_H\alpha_H - k_V\alpha_V)\cos^2\theta\cos 2\iota}{2k} \quad (8)$$

식 (7)와 (8)에서 ι 는 수평편파에 대한 상대 편파각으로 원편파의 경우에는 $\iota = 45^\circ$ 를 수직편파의 경우에는 $\iota = 90^\circ$ 를 대입한다. 또한, $k_H, k_V, \alpha_H, \alpha_V$ 는 Rec. ITU-R P.838-3^[16]에서 찾을 수 있으며, 이 때 해당 주파수가 지정되지 않았으면 그 주파수를 포함하는 두 개의 인접 주파수에 대한 값을 이용하여 추정하되, 계수 k 에 대해서는 대수적 보간법(logarithmic interpolation)을, 계수 α 에 대해서는 선형 보간법(linear interpolation)을 적용하여 추정한다.

Step 6: 연 시간을 0.01%에 대한 수평감소인자 $r_{0.01}$ 계산

연 시간을 0.01%에 대한 수평감소인자 $r_{0.01}$ 를 아래와 같이 계산한다.

$$r_{0.01} = \frac{1}{1 + 0.78 \sqrt{\frac{D\gamma_{R_{0.01}}}{f} - 0.38(1 - e^{-2D})}} \quad (9)$$

Step 7: 연 시간을 0.01%에 대한 수직조정인자 $\nu_{0.01}$ 계산

우리나라(위도(ϕ)= 38°)의 경우, 연 시간을 0.01%에 대한 수평감소인자 $r_{0.01}$ 를 아래와 같이 계산한다.

$$\nu_{0.01} = \frac{1}{1 + \sqrt{\sin\theta} \left(31(1 - e^{-\theta}) \frac{\sqrt{L_R \gamma_{R_{0.01}}}}{f^2} - 0.45 \right)} \quad (10)$$

여기서 $\zeta = \tan^{-1} \left(\frac{H_R - H_S}{Dr_{0.01}} \right) (\circ)$ 이며, $L_R(\text{km})$ 은 다음과 같다.

$$L_R = \begin{cases} Dr_{0.01} / \cos\theta & , \zeta > \theta \\ (H_R - H_S) / \sin\theta & , \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

Step 8: 유효 경로 길이 L_E 계산

다음과 같이 유효 경로 길이 $L_E(\text{km})$ 를 계산한다.

$$L_E = L_R \nu_{0.01} \quad (12)$$

Step 9: 연 시간율 0.01%에 대한 예측 강우감쇠 값 $A_{0.01}$ 계산

다음 식 (13)과 같이 연 시간율 0.01%에 대한 예측 강우감쇠 값 $A_{0.01}(\text{dB})$ 을 계산한다.

$$A_{0.01} = \gamma_{R_{0.01}} L_E \quad (13)$$

Step 10: $A_{0.01}$ 로부터 연 시간율 0.001%~5%에 대한 예측 강우감쇠 값 계산

우리나라(위도(ϕ)=38°)의 경우, 연 시간율 0.01%에 대한 예측 강우감쇠 값 $A_{0.01}$ 으로부터 시간율 0.001%~5%에 대한 예측 강우감쇠 값을 아래와 같이 구할 수 있다.

$$A_p = A_{0.01} \left(\frac{p}{0.01} \right)^{- (0.655 + 0.033 \ln(p) - 0.045 \ln(A_{0.01}))} \quad (14)$$

2.2 Crane 강우감쇠 예측 모델¹⁰⁾

Crane 강우감쇠 모델은 연 시간율 0.01%에 대한 강우감쇠를 기준으로 다른 시간율에 대한 강우감쇠를 예측하는 Rec. ITU-R P.618-8와 달리, 해당 시간율에 대한 강우강도를 이용하여 적용 시간율에 대한 강우감쇠만을 예측할 수 있다. 또한 Crane 강우감쇠 예측 모델에서는 강우강도에 따라 서로 다른 강우 높이가 고려되며, 경사 경로에 대한 높이 조정을 통해 예측된다. Crane 강우감쇠 예측 모델은 아래와 같은 단계로

진행된다.

Step 1: 해당 지역 강우강도 R_p 결정

해당 지역에 대해 연 시간율에 대한 강우강도 R_p 를 찾는다.

Step 2: 강우 높이 H_R 결정

강우 높이 H_R 은 0°C 등온선 높이에 기반한 위치 독립적 파라미터이며, 지상통신장비의 위도(ϕ, \circ)와 연 시간율($p, \%$)의 함수이다¹⁷⁾. 표 2에는 위도 38°를 중심으로 연 시간율 0.001%와 1%에 대한 강우 높이 값을 나타내었다¹⁰⁾. [10, Fig. 14]에서 알 수 있듯이, 어느 한 위도에서 시간율에 따른 강우 높이 변화는 거의 선형적이다. 따라서 다른 시간율에 대한 강우 높이 값은 표 2에서 주어진 시간율 0.001%, 1%에 대한 값을 이용하여 아래와 같은 대수적 보간법을 통해 구할 수 있다.

$$H_R = a + b \log(p) \quad (15)$$

Step 3: 경사 경로 L_S 및 지구 표면에 사영된 경로 길이 D 결정

경사 경로 L_S 의 수평 사영 경로의 길이 D 는 아래와 같이 구할 수 있다.

$$D = \begin{cases} (H_R - H_S) / \tan\theta, & \theta \geq 10^\circ \\ E\psi & , \theta < 10^\circ \end{cases} \quad (16)$$

표 2. 시간율 0.001%와 1%에 대한 강우 높이 H_R .
Table 2. Rain heights for the time percentages of an average year and latitudes.

Latitude(ϕ, \circ)	Mean annual rain height above mean sea level(H_R)	
	0.001%	1%
30	5.35	3.94
32	5.28	3.76
34	5.19	3.55
36	5.10	3.31
38	5.00	3.05
40	4.89	2.74
42	4.77	2.45
44	4.64	2.16
46	4.50	1.89

여기서,

$$\psi = \sin^{-1} \left[\frac{\cos \theta}{X_R} \left(\sqrt{X_S^2 \sin^2 \theta + 2E(H_R - H_S) + H_R^2 - H_S^2} - X_S \sin \theta \right) \right]$$

이며, $X_S = H_S + E$, $X_R = H_R + E$ 이고, 경사 경로는 경로 코도 각 θ 에 따라 다음 식 (17)으로부터 계산할 수 있다.

$$L_S = \begin{cases} D/\cos \theta & , \theta \geq 10^\circ \\ \sqrt{(X_S)^2 + (X_R)^2} - 2(X_S)(X_R)\cos \psi & , \theta < 10^\circ \end{cases} \quad (17)$$

만약 $D > 22.5\text{km}$ 이면, 아래 식으로 도출한 수정된 연 시간을 p' 에 대한 강우강도 R_p 와 $D_0 = 22.5\text{km}$ 를 강우감쇠 계산에 적용한다.

$$p' = p \left[\frac{D_0}{D} \right] \quad (18)$$

이 때 R_p 는 제공되는 연 시간에 따른 강우강도 값들에 대해 대수적 보간법을 적용하여 구한다.

Step 4: 특정 강우감쇠 계수 γ_R 결정

특정 강우감쇠 계수 γ_R 는 앞에서 살펴본 Rec. ITU-R P.618-8 모델의 step 5와 동일하게 구한다.

Step 5: 지구 표면에 사영된 감쇠 값 $A(R_p, D)$ or $A(R_p, D_0)$ 계산

지구 표면에 사영된 감쇠 값 $A(R_p, D)$ or $A(R_p, D_0)$ 은 다음 식에서 구할 수 있다.

$$A(R_p, D) = \begin{cases} kR_p^\alpha \left[\frac{e^{u\alpha d} - 1}{u\alpha} - \frac{b^\alpha e^{\alpha d}}{\alpha} + \frac{b^\alpha e^{\alpha D}}{\alpha} \right] & , d \leq D \leq 22.5\text{km} \\ kR_p^\alpha \left[\frac{e^{u\alpha D} - 1}{u\alpha} \right] & , D < dk\text{m} \\ kR_p^\alpha (H_R(p) - H_S) & , D = 0 \end{cases} \quad (19)$$

여기서 $A(R_p, D)$ 의 단위는 dB, R_p 의 단위는 mm/h, 그리고 특정 감쇠 계수 kR_p^α 의 단위는 dB/km이며, $H_R(p)$ 는 연 시간을 p 에 대한 강우 높이를 의미한다. 식 (19)에서 나머지 계수들은 구간 지수 모델 (piecewise exponential model)의 실험적 상수이며 다

음과 같이 주어진다.

$$u = \frac{\ln(b e^{\alpha d})}{d} \quad (20)$$

$$b = 2.3R_p^{-0.17} \quad (21)$$

$$c = 0.026 - 0.03\ln R_p \quad (22)$$

$$d = 3.8 - 0.6\ln R_p \quad (23)$$

Step 6: 경사 경로 L_S 에 따라 높이 조정

최종적인 경사 경로에 대한 강우감쇠 값(A_S)은 다음과 같이 계산된다.

$$A_S = \frac{L_S A(R_p, D)}{D} \quad (24)$$

III. 국내 강우강도 분포에 따른 강우감쇠 분석

앞서 언급하였듯이 지구 온난화 및 엘니뇨 현상으로 인하여 최근 국내 강우환경은 과거와 큰 차이를 보이고 있다. 따라서 통신 링크 설계 시 최근 강우환경에 대한 강우강도 분포를 적용하여야만 보다 정확한 강우감쇠가 예측될 수 있다. 본 절에서는 TTA.KO-06.0122/R1^[13]에서 제시한 지역별 최근 13년간의 강우강도 분포를 바탕으로 [9]와 [10]에서 국내 강우환경과 유사한 지역 및 영역을 찾고, Rec. ITU-R P.618-8와 Crane 강우감쇠 예측 모델에 적용하여 강우감쇠를 분석한다.

표 3에는 우리나라 주요 대도시에 대한 연 시간에 따른 강우강도를 나타내었다^[13]. 표 3에서 알 수 있듯이 최근 집중호우의 발생이 잦은 서울 지역의 강우강도가 다른 지역보다 세며, 대구의 강우강도는 상대적으로 약하다. 표 4에는 [9]와 [10]에서 제시되고 있는 전 세계의 강우 기후 지역 중 표 3의 서울과 대구의 강우강도와 유사한 강우강도 분포를 갖는 지역을 선택하여 나타내었다. 즉, [9]에서 제시한 세계 강우 기후 지역에서 보면 서울은 N-zone과 대구는 M-zone과 유사한 강우강도 분포를 나타내며, [10]에서 제시한 세계 강우 기후 영역에서 보면 서울은 E-region과 대구는 D3-region과 유사한 강우강도 분포를 나타낸다. 이를 [13]에서 제시된 우리나라 전국에 대한 강우강도 분포로 확대 적용해 보면, 서울과 같이 비가 많이 내리는 다우지역은 N-zone과 E-region으로, 대구

표 3. 전국 주요도시 1분 누적 강우강도(mm/h) 분포
Table 3. Rainfall intensity accumulated for one minute in the main domestic cities.

City	Time Per.	0.01%	0.05%	0.10%	0.50%	1.00%
Seoul		95.09	50.04	33.58	10.84	6.37
Incheon		75.73	42.17	28.27	9.51	6.06
Daegu		64.47	31.35	21.72	8.7	5.86
Daejeon		81.98	41.68	28.65	13.42	6.25
Kwangju		82.66	46.65	30.97	9.85	6.22
Pusan		86.95	43.05	29.91	10.7	6.46

표 4. [9]와 [10]에서 서울과 대구와 유사한 강우강도 분포를 갖는 지역의 강우강도 분포
Table 4. Rainfall intensity for the regions with Rainfall intensity similar to those of Seoul and Daegu in [9] and [10].

Time Per.	ITU-R P.837.1 ^[9]		Crane Model ^[10]	
	M-zone R(mm/h)	N-zone R(mm/h)	D3-region R(mm/h)	E-region R(mm/h)
1	4	5	4.6	7
0.5	-	-	8.2	12.6
0.3	11	15	11.8	18.4
0.2	-	-	15.2	24.1
0.1	22	35	22.4	36.2
0.05	-	-	31.6	50.4
0.03	40	65	39.9	62.4
0.02	-	-	47.0	72.2
0.01	63	95	61.6	91.5

와 같이 비가 적게 내리는 소우지역은 M-zone과 D3-region으로 분류 가능하며, 그 외 우리나라 대부분의 지역은 M-zone과 N-zone사이 혹은 D3-region과 E-region 사이에 위치하는 것으로 나타난다.

표 5에는 [3]에서 제시된 안테나 출력 및 지상통신장비 고도에 따른 무인항공기 운용 고도를 나타내었다. 본 논문에서는 [3]에서 제시된 가시선 링크 확보 시 지상통신장비 및 무인항공기 운용 고도에 대해 Rec. ITU-R P.618-8와 Crane 강우감쇠 예측 모델을 사용하여 M-zone과 N-zone 그리고 D3-region과 E-region에 대한 Ku대역 주파수의 강우감쇠를 분석한다. 즉, Ku대역 15GHz의 운용주파수, 99%의 강우 가용도, 0.5km의 지상통신장비 고도, 5km, 8km, 13km의 무인항공기의 운용고도, 300km까지의 가시선 링크 거리를 가정하여 결과를 도출한다.

그림 2에는 표 3에 나타낸 서울 지역의 강우강도 분포를 이용하여 Rec. ITU-R P.618-8와 Crane 강우

표 5. 안테나 출력 및 지상통신장비 고도에 따른 무인항공기 운용 고도
Table 5. Operating height for the given antenna output power and GDT height.

Ant. Output GDT Height	44dBi	32dBi
0m	7,927m	15,779m
100m	6,570m	14,422m
500m	5,169m	13,021m
1000m	4,319m	12,171m

감쇠 예측 모델을 이용하여 구한 통신 링크 거리에 따른 강우감쇠를 나타내었다. 그림 2를 통해 Crane 강우감쇠 예측 모델을 이용하여 구한 강우감쇠가 Rec. ITU-R P.618-8을 이용하여 구한 강우감쇠보다 더 낮은 강우높이가 적용되어 보다 작은 강우감쇠가 예측됨에도 불구하고 오히려 다소 크게 도출됨을 알 수 있는데, 이는 식 (16)에서 알 수 있듯이, 경사 경로 L_s 에 대한 수평 사영 경로 길이 D 가 단순히 경로 고도 각 θ 에만 의존하여 변하는 것이 아니라 ψ 에 따라 결정되고, 또한 D 가 22.5Km보다 큰 경우에는 식 (18)을 이용하여 연 시간을 p 에 대해 수정한 새로운 연 시간을 p' (항상 $p' < p$)를 적용하여 강우감쇠를 도출하기 때문이다. 뿐만 아니라, 무인항공기의 운용고도가 낮을수록 통신 링크의 고각(θ)이 작아져 강우에 영향을 받는 유효 경사 경로의 길이가 길어짐으로 인해 강우감쇠가 커짐을 알 수 있다. 그림 2에서 보이는 Crane 강우감쇠 예측 모델에 대한 강우감쇠 곡선에서의 약

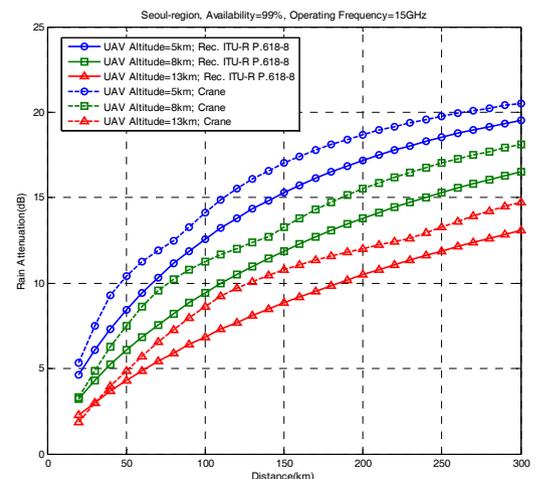


그림 2. Rec. ITU-R P.618.8^[12]과 Crane 강우감쇠 예측 모델^[10]로 구한 서울지역의 강우감쇠.
Fig. 2. Rain attenuation obtained by Rec. ITU-R P.618.8^[12] and Crane model^[10] in Seoul.

간의 굴곡은 표 3에 나타난 서울 지역에 대한 연 시간 율에 따른 강우강도 분포의 데이터 부족으로 인하여 발생한 것으로 판단된다.

그림 3과 4에는 M-zone과 N-zone, D3-region와 E-region에 대하여 각각 통신 링크 거리에 따른 강우 감쇠를 나타내었다. 그림 2에서와 마찬가지로, Crane 강우감쇠 예측 모델에서는 경사 경로 L_s 에 대한 수평 사영 경로 길이 D 가 단순히 경로 고도 각 θ 에만 의존

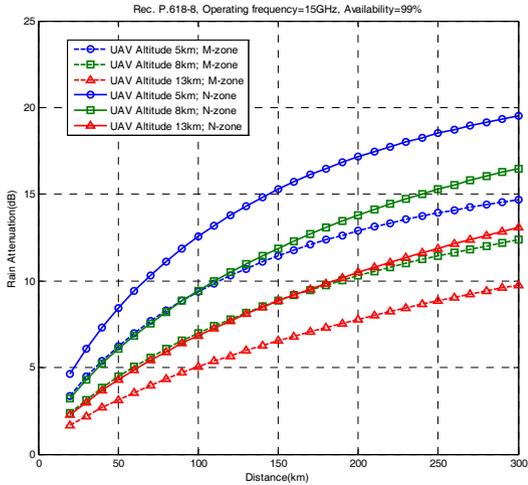


그림 3. Rec. ITU-R P.618.8^[12]로 구한 통신 링크 거리에 따른 M-zone과 N-zone의 강우감쇠.
Fig. 3. Rain attenuation obtained by Rec. ITU-R P.618.8^[12] according to the communication link distance on M-zone and N-zone.

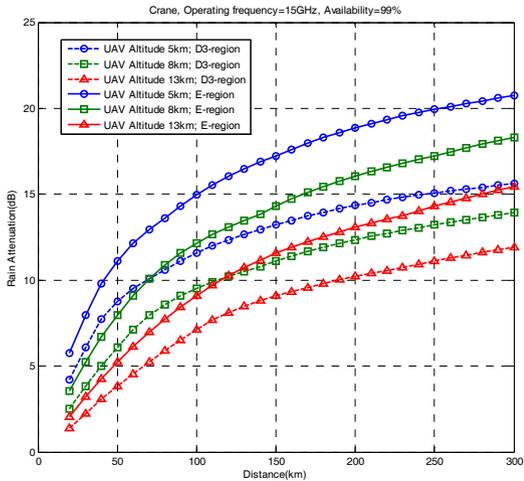


그림 4. Crane 강우감쇠 예측 모델^[10]로 구한 통신 링크 거리에 따른 D3-region과 E-region의 강우감쇠.
Fig. 4. Rain attenuation obtained by Crane model^[10] according to the communication link distance on D3-region and E-region.

하여 변하는 것이 아니라 ψ 에 따라 결정되고, 또한 D 가 22.5Km보다 큰 경우에는 식 (18)을 이용하여 연 시간을 p 에 대해 수정한 새로운 연 시간을 p' (항상 $p' < p$)를 적용하여 강우감쇠를 도출하기 때문에, Crane 강우감쇠 예측 모델을 이용하여 구한 강우감쇠가 Rec. ITU-R P.618-8을 이용하여 구한 강우감쇠보다 다소 크게 도출되며, 그림 3과 4를 통하여 그림 2에 나타난 서울지역의 강우감쇠는 [12]에서는 N-zone과 [10]에서는 E-region과 거의 동일함을 알 수 있다.

그림 5과 6에는 통신 링크 거리를 200km로, 무인 항공기 운용고도를 13km로 고정하여 각 모델에 대한 시간율에 따른 강우감쇠를 나타내었다. 그림 5과 6에서 볼 수 있듯이, 두 모델 모두 시간율이 작아질수록 강우감쇠는 지수적으로 증가하며, Crane 강우감쇠 예측 모델을 이용하여 구한 강우감쇠가 Rec. ITU-R P.618-8을 이용하여 구한 강우감쇠보다 시간율 전 범위에서 다소 크게 도출됨을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 Crane 강우감쇠 예측 모델을 이용하여 도출한 강우감쇠를 Ku 대역 무인항공기 데이터 링크에서 링크 마진 설계 시 적용할 경우, Rec. ITU-R P.618-8을 이용하여 도출한 강우감쇠를 적용하는 경우보다 큰 강우감쇠를 극복하게 됨으로써 단절 없는 통신 링크의 유지가 가능하게 되어, 시스템 운영 안정성 및 링크 신뢰성을 높일 수 있음을 알 수 있다.

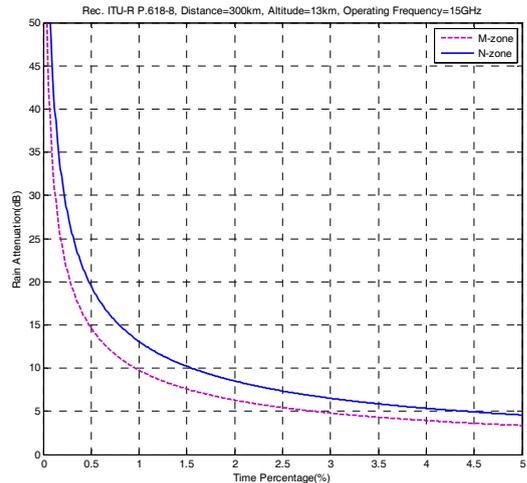


그림 5. Rec. ITU-R P.618.8^[12]로 구한 연 시간율에 따른 M-zone과 N-zone의 강우감쇠
Fig. 5. Rain attenuation obtained by Rec. ITU-R P.618.8^[12] according to the time percentage of an average year on M-zone and N-zone.

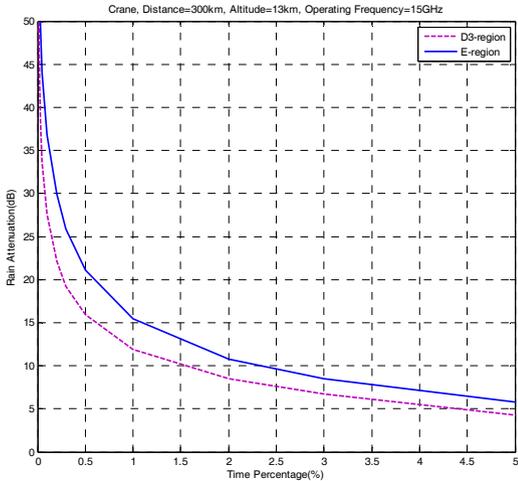


그림 6. Crane 강우감쇠 예측 모델^[10]로 구한 연 시간율에 따른 D3-region과 E-region의 강우감쇠.
 Fig. 6. Rain attenuation obtained by Crane model^[10] according to the time percentage of an average year on M-zone and N-zone.

IV. 결 론

최근 제시된 국내 지역별 강우강도 분포는 우리나라의 최근 강우 동향을 잘 나타내고 있다. 따라서 Ku 대역 통신 링크 설계 시 보다 현실에 맞는 안정적인 시스템 설계를 가능하게 하기 위해서는 이를 적용하여 도출한 강우감쇠를 링크 마진 분석 시 이용하여야 한다. 본 논문에서는 기존에 제시된 세계 강우 기후 지역 구분에서 우리나라의 최근 강우 동향에 맞는 강우 기후 지역을 선택하여 Ku대역에 대한 통신 링크 거리 및 연 시간율에 따른 강우감쇠를 Rec. ITU-R P.618-8와 Crane 강우감쇠 예측 모델을 기반으로 분석하였다. 분석결과 서울 지역과 같이 최근 집중호우가 잦은 다우 지역에서는 [9]에서의 N-zone과 그리고 [10]에서의 E-region과 유사한 강우강도 분포 및 강우감쇠를 보였으며, 대구 지역과 같이 비가 적게 오는 소우 지역에서는 [9]에서의 M-zone과 그리고 [10]에서의 D3-region과 유사한 강우강도 분포 및 강우감쇠를 보였다. 또한 모든 결과에서 Crane 강우감쇠 예측 모델을 이용하여 구한 강우감쇠가 Rec. ITU-R P.618-8을 이용하여 구한 강우감쇠보다 다소 크게 도출되었다. 이러한 결과들은 Crane 강우감쇠 예측 모델로 예측된 강우감쇠를 적용하여 링크 마진을 설계하는 것이 보다 높은 시스템 운영 안정성 및 링크 신뢰성을 얻는 것에 효과적일 수 있음을 보여준다 하겠으며, 본 논문의 분석 결과는 Ku 대역 통신 링크 설계

시 상당히 유효한 자료로 사용될 수 있을 것이다.

References

- [1] S. Moon, E. M. Oh, D. I. You, and D. H. Shim, "Implementation of a X-Plane and MATLAB/Simulink based simulation system for multiple UAVs," *J. Inst. Control, Robotics and Syst.*, vol. 19, no. 5, pp. 442-449, May 2013.
- [2] S. Kim, S. O. Cho, S. S. Kim, C. K. Ryoo, and K. Choi, "Development of operation system for network of multiple UAVs," *J. The Korea Soc. Aeronautical and Space Sci.*, vol. 39, no. 11, pp. 1042-1051, Nov. 2011.
- [3] J. Choi and C. Hur, "An analysis of UAV line-of-sight according to mission environment," *J. Korea Inst. Inf. and Commun. Eng.*, vol. 17, no. 6, pp. 1414-1418, June 2013.
- [4] B. K. Kim, J. Kim, D. K. Lee, T. S. Kim, and I. K. Kim, "Analysis and design of ku-band airborne video transceiver system for smart-UAV," *J. KICS*, vol. 29, no. 7A, pp. 807-813, Jul. 2004.
- [5] J. S. Park, "Rain attenuation analysis for ku band line-of-sight communication system of UAVs," in *Proc. KICS 2013 Fall Conf.*, pp. 684-685, Nov. 2013.
- [6] J. J. Park and D. Y. Choi, "Rainfall intensity distribution with accumulative time on the basis of 1-minute rain rate in korea," *J. KICS*, vol. 37, no. 2, pp. 49-54, Apr. 2012.
- [7] S. H. Hwang and H. J. Choi, "Bit error bounds for trellis coded asymmetric 8PSK in rain fading channel," *J. KICS*, vol. 25, no. 5B, pp. 797-808, May 2000.
- [8] D. Y. Choi, J. S. Kim, and S. K. Noh, "A study on the prediction of rain attenuation for ku-band in korean rain environment," *J. KICS*, vol. 36, no. 2, pp. 1-6, Feb. 2011.
- [9] Recommendation ITU-R PN.837-1, *Characteristics of precipitation for propagation modelling*, 1994.
- [10] R. K. Crane, "Prediction of attenuation by

- rain,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-28, no. 9, pp. 1717-1733, Sept. 1980.
- [11] Recommendation ITU-R P.618-5, *Propagation data and prediction methods required for the design of earth-space telecommunication systems*, 1997.
- [12] Recommendation ITU-R P.618-8, *Propagation data and prediction methods required for the design of earth-space telecommunication systems*, 2003.
- [13] TTAK.KO-06.0122/R1, *Reginal rainfall-rate distribution for designing radio Communication Links in Korea*, 2013.
- [14] R. L. Olsen, D. V. Rogers, and D. B. Hodge, “The aR^b relation in the calculation of rain attenuation,” *IEEE Trans. Antenna and Propag.*, vol. AP-26, no. 2, pp. 318-329, Mar. 1978.
- [15] Recommendation ITU-R P.839-3, *Rain height model for prediction methods*, 2001.
- [16] Recommendation ITU-R P.838-3, *Specific attenuation model for rain for use in prediction methods*, 2005.
- [17] L. J. Ippolito, Jr., *Satellite communications systems engineering*, 1st Ed., Chichester, United Kingdom: Jone Wiley and Sons, 2008.

이재윤 (Jaeyoon Lee)



2002년 2월 : 대전대학교 정보통신공학과 졸업

2004년 2월 : 대전대학교 정보통신공학과 석사

2008년 2월 : 한양대학교 전자통신컴퓨터공학과 박사

2008년 3월~2012년 1월 : 한양대학교 연구조교수

2012년 2월~2014년 8월 : 한국전자통신연구원 선임연구원

2014년 9월~현재 : 특허청 심사관

<관심분야> 통신 이론, 무선 및 이동 통신 시스템, VLSI