

레이더 신호 감쇠에 미치는 강우 영향성 분석

An analysis of issue related to rain attenuation for radar signals

김태영^{*.1)}

Tae young Kim^{*.1)}

[초 록]

본 논문에서는 레이더용 주파수 대역에서 강우 요인에 의한 레이더 신호 감쇠를 분석하였다. 제안된 논문은 L, S, C, X 대역에서 강우 요인에 의한 감쇠를 분석하였으며, 또한 대기 요인인 산소, 수증기 등에 의한 신호 감쇠도 분석하였다. 분석 결과 대기 감쇠인 수증기와 산소에 의한 레이더 신호 감쇠는 미미하며, 강우에 의한 레이더 신호 감쇠는 L 대역에서 최소 0.06dB, X 대역에서 최소 20.2dB이었으며, 최종 L 대역에서 최소 0.416dB, X 대역에서 최소 22.8dB로 분석되었다. 결론적으로 L, S, C 대역에서 산소, 수증기 및 강우의 감쇠가 미미하며, X 대역에서 강우에 의한 레이더 신호 감쇠 영향이 큰 것으로 판단된다.

[ABSTRACT]

In the proposed paper, we analyzed the attenuation by atmospheric factors in the frequency bands for Radar. Radio frequencies using radar systems is susceptible to attenuation by atmospheric factors. The proposed paper analyze the attenuation by atmospheric factors in L, S, C and X bands. Among the attenuation of signals by atmospheric factors, the attenuation by water vapor and oxygen, which is atmospheric attenuation compared to the detection range, is minimal. The attenuation by rainfall is at least 0.06dB in the L band and 20.2dB in the X band. Finally, the attenuation by atmospheric factors is at least 0.416dB in the L band and 22.8dB in the X band. In conclusion, it is judged that the attenuation of atmospheric and rainfall is minimal in the L, S, and C bands, and that the influence of attenuation is large in the X band.

Key Words : Rainfall Attenuation(강우 감쇠), Attenuation Estimation(감쇠 예측)

1. 서론

최근 러시아-우크라이나 전쟁, 이스라엘-팔레스타인 분쟁 등으로 항공기, 미사일 등과 같은 기존의 무기 체계 뿐만 아니라 동시에 드론, 무인기와 같은 신규 무기 체계의 등장으로 다양한 표적 정보를 탐지 추적하는 레이더의 중요성이 대두되고 있다. 특히, 이동식 및 항공기 탑재식 레이더는 한정적인 공간과 자원으로 최적의 효율을 내기 위해서는 소형화 및 경량화가 필수적이며, 이는 레이더 설계 단계부터 고려해야 한다. 즉 레이더의 출력전력이 증가하면 할수록 발열이 증가하게 되며 그로 인한 냉각 구조도 복잡하게 된다.

더불어 고려되어야 할 사항으로 엘리뇨 및 라니냐와 같은 전 세계적으로 급격히 변화하는 이상 기후로 집중호우의 발생 빈도 및 연중 강우량 증가로 인해 무선 전파를 사용하여 표적을 탐지 추적하는 레이더 체계에서는 대기중 신호 감쇠 영향성이 점점 증가하고 있다. 이로 인해 클러터 증가, 탐지거리 축소 등과 같은 치명적인 문제점이 증가하는 추세이다. 일반적으로 주파수가 높아질수록 파장이 짧아져 강한 직진성을 가지며, 이는 대기중 전자파의 전파는 자유공간상의 손실뿐만 아니라 수증기나 산소 기체, 강우와 같은 고체성 입자들에 의한 산란 및 흡수에 의한 레이더 신호의 감쇠가 일어난다. 대기중 레이더 신호의 감쇠 요인은 크게 산소, 수증기에 의한 감쇠와 강우와 같은 강우 감쇠로 나누어진다. 산소, 수증기에 의한 감쇠의 경우 온도, 대기압, 고도에 따라 선형적으로 변화하고 대기도 균질함으로 전파 전달에서 수증기나 산소 분자 공진에 의한 영향만을 고려해야 하며, 다른 대기 성분은 밀도가 희박함으로 무시할 수 있다. 반대로 강우 감쇠는 강위 범위, 구름 밀도 및

1) 한화시스템 DE사업부 레이더연구소
(The radar Research , Hanwha Systems, Korea)
* Corresponding author. E-mail:
ty2460.kim@hanwha.com
Copyright © The Korean Institute of Defense Technology
Received : July 8, 2025 Revised : September 29, 2025
Accepted : September 30, 2025

반경, 빔방울 크기 및 모양 등에 따라 감쇠의 영향력이 달라진다. 이는 산란과 흡수 현상 때문이라고 할 수 있다. 그러므로, 대기 기체에 의해 산란되는 양인 대기 감쇠는 미미하지만 대기중 강우에 의한 감쇠는 크다고 할 수 있다^[1-3]. 다시 말하면, 감쇠에 가장 큰 영향을 주는 것은 강우에 의한 것이며, 감쇠 정도는 강우의 입자 직경 및 파장과와의 관계에서 영향을 주어 레이더의 탐지 추적 특성에 영향을 미칠 수 있다.

감쇠 모델링 방법에는 물리적 모델링의 기아니(Ghiani) 모델, 경험적 모델링의 크레인(Crane) 모델, 및 통계적 모델링의 국제전기통신연합 권고(ITU-R) 모델 등 다양한 접근법이 있다. 그 중에서도 경험적 모델링인 크레인 모델은 수학적으로 설명할 수 있는 입력-출력 관계가 아닌 실험 데이터 관찰을 기반으로 하여 감쇠 모델링을 분석하는 모델링 기법이다. 통계적 모델링 방식의 ITU-R 모델은 통계적 날씨 및 인프라 데이터 분석을 기반으로 대기 및 강우 감쇠 인자에 대한 기초 정보를 지역별로 구분하여 ITU-R에서 제시하고 있으며, 이를 바탕으로 분석 결과를 도출하는 대표적인 감쇠 모델링 기법이라 할 수 있다.

본 논문에서는 통계적 모델링 기반인 국제전기통신연합인 Rec. ITU-R P. 676(대기 가스의 감쇠를 추정하는 방법)^[4], Rec. ITU-R P. 837(전파 모델링을 위한 강우 특성 계산 방법)^[5], Rec. ITU-R P. 838(특정 감쇠를 계산하는 방법)^[6], Rec. ITU-R P. 530(맑은 공기와 강우 시 전파 효과에 대한 예측 방법)^[7] 및 한국정보통신기술협회(TTA)^[13]에서 제공하는 신뢰성 높은 데이터로 환경 요인에 따른 주파수별 감쇠 인자의 영향성을 분석하고, 이를 통해 레이더 설계 단계부터 주요 주파수 대역별 환경 요인에 의한 산소, 수증기에 의한 감쇠 및 강우 감쇠 특성을 예측할 수 있는 모델을 과학적 및 체계적으로 분석하여 감쇠에 대한 적절한 방안을 제시하고자 한다.

2. 레이더 신호 특성

현대 레이더에서 사용되는 주파수 대역은 L(1~2GHz), S(2~4GHz), C(5~6GHz) 및 X(8~12GHz) 대역이 있으며, L 대역에서 X 대역으로 주파수가 올라갈수록 분해능이 향상되고, 대용량 데이터를 처리할 수 있는 장점이 있지만 레이더 신호 감쇠 측면에서 볼 때 신호 감쇠에 민감하다는 취약점이 있다. 이것은 동일한 출력전력을 사용할 경우 탐지거리가 축소되는 것을 의미한다.

2.1 레이더 방정식의 특성

레이더 주파수 대역별 대기중 신호 감쇠를 예측 및 분석하기 위해서는 먼저 자유공간상에서의 레이더의 전력 레벨 변화를 확인해서 이를 통해 자유공간상의 경로 손실을 알아야 한다. 식 (1)은 레이더 수신단 입력에서의 침투 전력을 나타내었다.

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} \quad (1)$$

여기서 P_r 는 수신전력, P_t 는 송신전력, G_t 는 송신 안테나 이

득, G_r 는 수신 안테나 이득, λ 는 주파수 파장, σ 는 레이더 반사 면적(RCS: Radar Cross Section), R 은 레이더 탐지거리, $\lambda^2/(4\pi R)^2$ 은 자유공간손실이다. 식 (1)에서 자유공간상의 레이더 신호에 대한 경로 손실을 구분하기 위해 재배열하면 식 (2)와 같다.

$$P_r = P_t G_t G_r \left[\frac{\lambda^2}{(4\pi R)^2} \right] \left[\frac{4\pi\sigma}{\lambda^2} \right] \left[\frac{\lambda^2}{(4\pi R)^2} \right] \quad (2)$$

식 (2)를 dB로 변환하면 식 (3)과 동일하다.

$$10\log P_r = 10\log P_t + 10\log G_t + 10\log G_r + 20\log \left[\frac{\lambda}{4\pi R} \right] + 10\log \left[\frac{4\pi\sigma}{\lambda^2} \right] + 20\log \left[\frac{\lambda}{4\pi R} \right] \quad (3)$$

식 (3)의 우측 4번째항은 송신 시 자유공간손실, 5번째항은 표적 이득, 6번째항은 표적으로부터 수신 시 자유공간손실이다. 식 (3)을 단순화하면 식 (4)와 같다.

$$10\log P_r = 10\log P_t + 10\log G_t + 10\log G_r + 10\log G_\sigma - 2L_\alpha \quad (4)$$

여기서 L_α 는 주파수별 레이더 신호에 대한 자유공간손실이며, $L_\alpha = 92.45 + 20\log f_{GHz} + 20\log R_{km}$ 의 값을 갖는다. 표 1에서 L_α 는 거리, 주파수 단위에 따라 변경된다.

표 1. 자유공간손실^[8]

Table 1. Free Space Loss

자유공간손실 L_α	단위
$L_\alpha = 32.45 + 20\log f_{MHz} + 20\log R_{km}$	거리 km
$L_\alpha = 92.45 + 20\log f_{GHz} + 20\log R_{km}$	
$L_\alpha = 37.8 + 20\log f_{MHz} + 20\log R_{NM}$	거리 NM
$L_\alpha = 97.8 + 20\log f_{GHz} + 20\log R_{NM}$	

그림 1은 식 (4)에 대해 자유공간상에서의 손실을 고려한 레이더 방정식의 송수신 전력 레벨을 나타내었다.

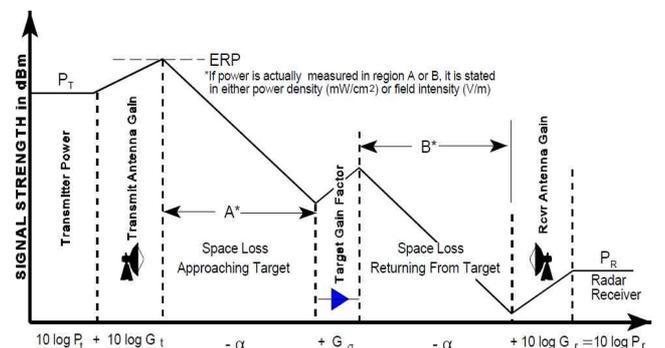


그림 1. 양방향 레이더 방정식 송수신 전력 레벨

Fig. 1. Visualization of Two-Way Radar Equation^[8]

표 2는 그림 1의 주파수 대역별 레이더 신호의 탐지거리 R에 따른 양방향 자유공간손실 L_a 를 계산하였다.

표 2. 양방향 레이더 자유공간손실
Table 2. Free Space Loss of Two-Way Radar

주파수 대역	탐지거리 R 양방향 자유공간손실 L_a [dB]			
	R : 40km	R : 60km	R : 80km	R : 100km
L 대역	261.0	268.0	273.0	276.8
S 대역	273.0	280.1	285.1	289.0
C 대역	280.1	287.1	292.1	296.0
X 대역	289.0	296.0	301.0	304.9

2.2 레이더 방정식의 특성

일반적으로 주파수가 증가하면 할수록 대기를 통한 전자파의 전파는 산란, 흡수, 반사, 굴절 등과 같이 매질 방해 요소가 없는 공간인 자유공간손실 뿐만 아니라 다음과 같은 감쇠 요소들을 고려하여야 한다.

- ① 산소, 수증기 성분에 의한 레이더 신호 감쇠
- ② 비, 안개, 이슬 등 강우에 의한 레이더 신호 감쇠

①의 경우 전자파의 전파에 있어 수증기나 산소 분자의 공진에 의한 영향을 고려한 것이며, ②의 경우는 전자파의 흡수와 산란에 의한 감쇠인 강우를 고려한 것이다^[9-11]. 식 (5)는 이러한 감쇠 요소들을 최종 반영한 레이더 수신단의 입력에서의 침투 전력을 나타내었다.

$$10\log P_r = 10\log P_t + 10\log G_t + 10\log G_r + 10\log G_\sigma - 2L_a - A_w - A_o - A_R \quad (5)$$

여기서 A_w 는 수증기에 의한 감쇠, A_o 는 산소에 의한 감쇠, A_R 는 강우에 의한 감쇠를 의미한다. 수증기와 산소는 대기에서 균질적인 분포를 보이며, 온도, 대기압, 및 고도에 따라 선형적으로 변화하는 감쇠 특성을 갖는다. 반면에 강우는 비균질적인 분포를 보이며, 강우의 범위, 크기에 따라 변화하는 감쇠 특성을 갖는다. 그러므로 레이더 신호의 감쇠는 식 (5)의 양방향 자유공간손실 L_a 와 산소, 수증기 및 강우에 의한 손실로 구분된다. 식 (6) L_t 는 레이더 신호에 대한 총 감쇠는 자유공간손실 및 산소, 수증기, 강우에 의한 손실의 합을 나타낸다.

$$L_t = 2L_a + A_w + A_o + A_R \quad (6)$$

2.2.1 산소, 수증기에 의한 레이더 신호 감쇠

레이더 신호의 대기중 감쇠 특성을 이해하기 위해서는 먼저 레이더 신호가 얼마나 먼 거리까지 송수신되는지 파악할 필요가 있다. 국내 레이더의 운용 개념은 한국형 미사일 방어체계(KAMD) 기반으로 각 레이더에 대한 탐지 추적하는 거리로 추

정할 수 있다. 그림 3은 한국형 미사일 방어체계 구성도이다.



그림 3. 한국형 미사일 방어체계
Fig. 3. Korea Air and Missile Defense(KAMD)

또한, 레이더 신호의 감쇠 요인과 밀접한 지구 대기권의 특징이다. 대류권은 지표에서 최대 20km까지이며 고도에 따라 온도가 변화하며, 질소 78%, 산소 21%, 아르곤 0.9%, 이산화탄소 0.1%, 네온/헬륨/크립톤 0.0001%, 농도가 변하는 수증기 0~2%, 그 이외의 물질로 구성되어 있다. 성층권은 오존층이 존재하며, 중간권은 수증기가 존재하지 않는다. 더불어 열권은 전리층이 존재하는 것이 가장 큰 특징이다. 환경 요인에 의한 레이더 신호의 감쇠는 상당 부분은 대류권에서 발생된다. 이 중에서 수증기는 전기 쌍극자 모멘트를 가지며, 산소는 자기 쌍극자 모멘트를 가지므로 대기로 전송되는 주파수는 이들 쌍극자의 고유 주파수에 일치하면 공진 현상이 일어나 전송되는 전파의 일부가 이들 분자에 흡수되어 대기 감쇠가 일어난다. 표 4는 지구 대기권의 주요 특징을 나타낸다.

표 4. 지구 대기권
Table 4. Atmosphere of Earth

지구 대기권	고도[km]	주요 특징
대류권 (Troposphere)	~20	- 질소, 산소, 수증기 - 고도에 따른 온도 하강
성층권 (Stratosphere)	~50	- 오존층 존재 - 고도에 따른 온도 상승
중간권 (Mesosphere)	~85	- 수증기 무존재 - 고도에 따른 온도 하강
열권 (Thermosphere)	~690	- 전리층 존재 - 고도에 따른 온도 상승
외기권 (Exosphere)	~10,000	- 수소, 헬륨 - 고도에 따른 온도 상승

국제전기통신 연합의 Rec. ITU-R P.676-1의 대기(산소, 수증기) 감쇠 모델에 따르면 지구의 평균 대기 상태(Standard air condition)인 대기압 1.013hPa, 온도 15°C, 수증기 밀도

7.5g/m³에서 주파수 대역별 수증기 및 산소에 의한 감쇠 (dB/km)를 추정할 수 있다. 먼저 수증기에 의한 감쇠 A_w 는 주파수에 따라 식 (7)에 의해 예측할 수 있으며 유효 주파수 범위는 350GHz까지이다^[4].

$$A_w = [0.05 + 0.0021\rho + \frac{3.6}{(f - 22.2)^2 + 8.5} + \frac{10.6}{(f - 183.3)^2 + 9} + \frac{8.9}{(f - 325.4)^2 + 26.3}]f^2 \cdot \rho \times 10^{-4} \text{ [dB/km]} \quad (7)$$

여기서 ρ 는 수증기 밀도, 일반적으로 7.5 g/m³이고, f 는 주파수, 단위는 GHz이다. 산소에 의한 감쇠 A_o 는 주파수가 57GHz 미만일 때 식 (8)과 같다^[4].

$$A_o = [7.19 \times 10^{-3} + \frac{6.09}{f^2 + 0.277} + \frac{4.81}{(f - 57)^2 + 1.5}]f^2 \times 10^{-3} \text{ [dB/km]} \quad (8)$$

주파수가 57GHz 이상일 때 식 (9)와 같다^[4].

$$A_o = [3.79 \times 10^{-7}f + \frac{0.265}{(f - 63)^2 + 1.59} + \frac{0.028}{(f - 118)^2 + 1.47}]f^2 \times 10^{-3} \text{ [dB/km]} \quad (9)$$

레이더 신호에 따른 수증기와 산소에 의한 대기 감쇠 A_a 는 식 (7)에서 (9)를 이용하여 식 (10)을 구할 수 있다^[4].

$$A_a = R(A_w + A_o) \text{ [dB]} \quad (10)$$

여기서 A_w 는 수증기에 의한 감쇠, A_o 는 산소에 의한 감쇠, R 은 탐지거리이다. 표 5는 식 (7) ~ (9)를 이용하여 레이더 신호에 대한 주파수별 수증기 A_w 에 의한 거리당 최대 감쇠는 0.006dB/km 이하이며, 산소 A_o 에 의한 거리당 최대 감쇠는 0.007dB/km 이하이다. 그림 4는 수증기 및 산소에 의한 감쇠 그래프이다.

표 5. 수증기, 산소에 의한 레이더 주파수별 신호 감쇠

Table 5. Atmospheric Attenuation

주파수 대역	수증기 A_w 에 의한 레이더 신호 감쇠 [dB/km]	산소 A_o 에 의한 레이더 신호 감쇠 [dB/km]
L 대역	0.0002	0.005
S 대역	0.0009	0.006
C 대역	0.002	0.006
X 대역	0.006	0.007

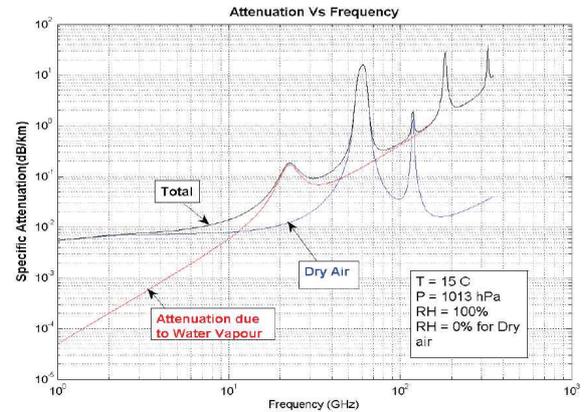


그림 4. 수증기, 산소에 의한 주파수별 신호 감쇠 예측
Fig. 4. Prediction of Atmospheric Attenuation^[4]

표 6은 표 5와 식 (10)을 이용하여 주파수별 레이더 신호의 탐지거리 R 에 따른 대기 감쇠 A_a 이다. 탐지거리 R 은 40~100km이고, 주파수별 레이더 신호에 대한 대기중 최대 감쇠량은 L 대역에서 1.04dB, X 대역에서 2.6dB 이하였다.

표 6. 탐지거리에 따른 수증기, 산소에 의한 대기 감쇠
Table 6. Atmospheric Attenuation of Detection Range

주파수 대역	탐지거리 R에 따른 의한 대기 감쇠 A_a [dB]			
	R : 40km	R : 60km	R : 80km	R : 100km
L 대역	0.416	0.624	0.832	1.04
S 대역	0.552	0.828	1.01	1.38
C 대역	0.640	0.960	1.28	1.60
X 대역	1.04	1.56	2.08	2.60

2.2.2 강우에 의한 레이더 신호 감쇠

주파수별 레이더 신호의 감쇠에서 가장 큰 영향을 주는 것은 강우에 의한 요인이다. 강우에 의한 주파수별 신호 감쇠를 알기 위해서는 그림 5와 같은 단계를 통해 분석 및 예측할 수 있다.

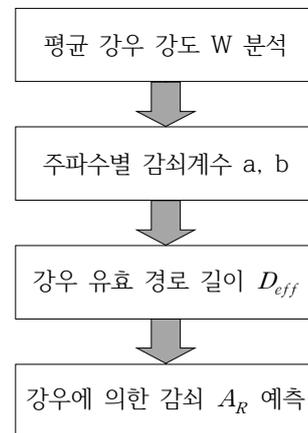


그림 5. 강우에 의한 신호 감쇠 절차
Fig. 5. Procedure of Rain Attenuation Prediction

강우 감쇠는 단위 체적당 강우 입자 수(빗방울 밀도분포)에 따라 다르다. 즉, 강우 강도가 낮으면 강우의 직경이 작고 밀도는 높으며, 반면에 강우 강도가 높을수록 강우의 직경이 커져 강우 감쇠가 증가하게 된다. 또한, 지속적인 강우보다 순간적으로 내리는 집중 호우가 강우 감쇠가 높아 레이더 신호의 손실에 더 많은 영향을 준다.

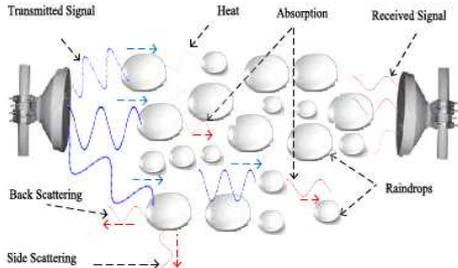


그림 6. 강우에 의한 전자파 전파 영향

Fig. 6. Impact of rain on the propagation of Radio wave^[12]

그림 6은 전자기파인 레이더 신호의 전파 환경에서 전자기파가 강우에 의해 열, 산란 및 흡수로 변환됨을 보여준다^[12]. 강우에 의한 감쇠의 가장 큰 특징은 수증기 및 산소에 의한 대기 감쇠와는 달리 공간적으로 분포가 균일하지 않으며 지역별로 강우에 의한 감쇠량이 다르다고 의미할 수 있다. 이로 인해 강우에 의한 감쇠를 예측하기 위해서는 지역별 시간당 강우량(mm/hr)을 기초하여 평균 강우 강도 W와 a, b 값의 관계식(11)을 이용하여 강우에 의한 감쇠 A_R 을 구할 수 있다^[6].

$$A_R = aW^b [dB/km] \quad (11)$$

여기서 A_R 은 강우에 의한 감쇠, W는 평균 강우 강도, a, b는 주파수와 온도의 함수이다. 평균 강우 강도 W는 국제전기통신연합의 Rec. ITU-R P. 837-1에 권고된 전세계 지역의 강우 분포도에서 대한민국의 강우 모델인 K 지역을 적용하여 평균 강우 강도 W를 구할 수 있다. 그림 7은 전세계 지역의 강우 분포도이다.

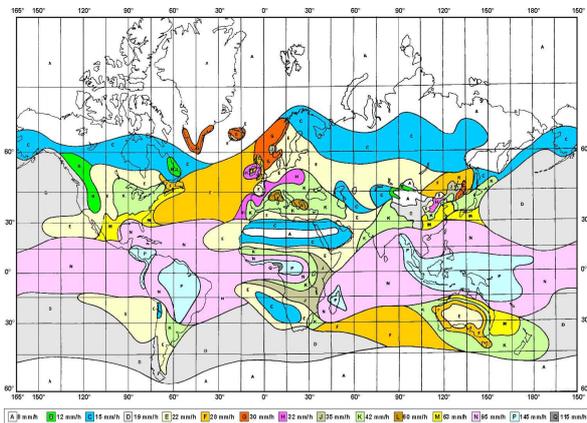


그림 7. 국제전기통신연합 세계 지역 강우 분포도

Fig. 7. ITU-R Rain regions, Korea and World^[5]

먼저 강우에 의한 감쇠를 예측하기 위해서는 어떻게 하면 강우 강도를 정확히 구할 수 있는지가 매우 중요하다. 국제전기통신연합(ITU)에서는 강우량의 측정시간 간격을 1분 간격으로 권고하고 있다. 즉, 시간당 강우량의 측정시간 간격이 좁을수록 정확한 강우 강도를 구할 수 있으며, 강우량 측정시간이 넓을수록 부정확한 강우 강도를 추정하게 된다. 그러나, 현실적으로 엘니뇨나 라니냐와 같은 이상 기후 및 지역별 다양한 제약조건으로 1분 간격의 데이터를 확보하기가 쉽지 않다. 그러므로 본 논문에서는 국제전기통신연합에서 대한민국에 적용한 K 모델과 한국정보통신기술협회(TTA)의 데이터를 기반으로 강우 강도를 구하였다^[13]. 더불어 강우 강도의 연평균 시간율로 세분화하였다. 연평균 시간율을 적용한 강우 강도라 하면 강우 강도 W(mm/hr) 이상인 기간이 연간 몇%에 해당하는지를 의미한다. 예를 들면, 연평균 시간율이 0.01%에 강우 강도 42mm/hr라 하면 강우 강도가 42mm/hr 이상인 기간이 일년 365일, 526,000분 중 0.00365일 52.56분에 해당한다는 의미이다. 표 7은 연평균 시간율 1 ~ 0.01%에 따른 대한민국 및 지역별 강우 강도 W를 나타내었다.

표 7. 시간율에 따른 전세계 및 대한민국 평균 강우 강도

Table 7. Average Rainfall^[5,13]

연평균 시간율 p(%)	전세계 지역별 평균 강우 강도 W [mm/hr]			
	A 지역	F 지역	K 지역	Q 지역
1.0	0.1	1.7	2.0	24
0.1	2	8	12	72
0.01	8	28	42	115

연평균 시간율 p(%)	대한민국 지역별 평균 강우 강도 W [mm/hr]			
	서울	대전	부산	광주
1.0	6.37	6.25	6.46	6.22
0.1	33.58	28.65	29.91	30.97
0.01	95.09	81.98	86.95	82.66

연평균 시간율에 따른 평균 강우 강도를 레이더 시스템에 적용하면 강우 강도 W 이상일 때 레이더 시스템의 품질 및 성능을 유지하는 것이 어렵다고 할 때 레이더 시스템의 전체 운용 시간중 연평균 운용 시간율에 해당하는 시간만큼 레이더 시스템의 운용 단절을 예상됨을 의미하며, 이는 목표하고자 하는 레이더 시스템의 성능을 100% 발휘할 수 없음을 의미한다. 즉 다시 말하면, 연평균 시간율에 따른 평균 강우 강도는 레이더 시스템의 품질유지에 요구되는 신뢰도가 99.99%일 경우 연평균 시간율 0.01%에 해당되는 강우 강도에서는 레이더 시스템의 운용이 단절됨을 의미한다고 할 수 있다. 그러므로, 연평균 시간율은 다른 의미로 비가용도 p로 표현된다. 국제전기통신연합에서는 비가용도(연평균 시간율에 따른 강우 강도) 중 0.01%를 최악의 경우로 가정한다. 비가용도 0.01%를 보장하려면 Rec. ITU-R P. 837-1에 권고된 대한민국의 강우 강도

는 42mm/hr이고, 한국정보통신기술협회의 데이터를 기반한 지역별 강우 강도는 최악인 서울을 기준으로 95.09mm/hr가 된다. 그리고 감쇠계수는 Rec. ITU-R P. 838-1에 권고된 주파수 편파에 대한 a, b 값이다. 표 8과 같다.

표 8. 주파수별 신호 감쇠계수

Table 8. Coefficients for estimating specific attenuation^[6]

주파수 대역	a, b값			
	a_H	a_V	b_H	b_V
L 대역	0.000154	0.000138	0.912	0.880
S 대역	0.00065	0.00059	1.121	1.075
C 대역	0.00175	0.00155	1.308	1.265
X 대역	0.0101	0.00887	1.276	1.264

표 8의 주파수와 온도의 함수 a, b 및 관계식 (11)를 이용하여 표 9와 같이 평균 강우 강도 W에 의한 거리당 주파수 대역별 편파 감쇠를 계산할 수 있다.

표 9. 평균 강우 강도에 따른 주파수 편파별 신호 감쇠량
Table 9. Polarization Attenuation of Average Rainfall

주파수 대역	연평균 시간율 p%	ITU K 기준 평균 강우 강도 W [mm/hr]	수평 편파 [dB/km]	수직 편파 [dB/km]
L 대역	1.0	2	0.0003	0.0002
	0.1	12	0.0014	0.0012
	0.01	42	0.004	0.003
S 대역	1.0	2	0.0014	0.0012
	0.1	12	0.010	0.008
	0.01	42	0.04	0.03
C 대역	1.0	2	0.004	0.003
	0.1	12	0.04	0.003
	0.01	42	0.23	0.17
X 대역	1.0	2	0.024	0.021
	0.1	12	0.24	0.20
	0.01	42	1.19	0.99

주파수 대역	연평균 시간율 p%	TTA 서울 기준 평균 강우 강도 W [mm/hr]	수평 편파 [dB/km]	수직 편파 [dB/km]
L 대역	1.0	6.37	0.0008	0.0007
	0.1	33.58	0.0038	0.0030
	0.01	95.09	0.01	0.007
S 대역	1.0	6.37	0.0051	0.0043
	0.1	33.58	0.033	0.025
	0.01	95.09	0.1	0.07
C 대역	1.0	6.37	0.019	0.016
	0.1	33.58	0.17	0.13
	0.01	95.09	0.67	0.49
X 대역	1.0	6.37	0.1	0.09
	0.1	33.58	0.89	0.75
	0.01	95.09	3.37	2.81

표 9에서는 각 주파수별에 대한 평균 강우 강도 W가 변화될 때 주파수별 수평편파, 수직편파 둘 다 L, S, C 대역에서는 변화가 작으나 X 대역에서는 거리당 강우에 의한 신호 감쇠가 급격히 증가함을 알 수 있다. 특히 국제전기통신연합이 대한민국의 강우 강도로 제시한 값보다 한국정보통신기술협회(TTA)의 강우 강도 적용시 강우에 대한 감쇠는 더 크다는 것을 알 수 있다. 이는 국제전기통신연합이 제시한 K 모델 지역별 내에서도 평균 강우 강도 편차가 크며 강우에 의한 정확한 감쇠값을 반영할 수 없음을 의미한다. 이 같은 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 한국정보통신기술협회(TTA)에서 제공한 데이터를 준용하였다. 더불어 강우에 의한 감쇠를 정확하게 구하기 위해 연평균 시간을 대비 평균 강우 강도 W 뿐만 아니라 강우 분포 범위를 어떻게 적용하느냐가 중요하다. 즉, 강우 감쇠는 집중 호우와 같이 강우가 일시적으로 집중될 때 주파수별 강우에 의한 감쇠가 증가함을 의미한다. 그림 8은 강우 유효 경로 길이를 적용한 강우 분포도이며, 식 (12)와 같다^[7].

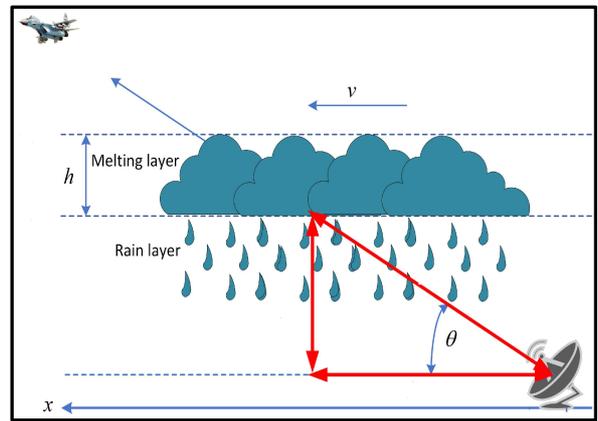


그림 8. 강우 유효 경로

Fig. 8. Rain Attenuation Path

$$D_{eff} = R \times r \text{ [km]} \tag{12}$$

$$r = \frac{1}{(1 + R/R_0)} \cdot R_0 = 35R^{-0.015W_{0.01}} \text{ (} W_{0.01} \leq 100\text{mm/hr)}$$

여기서 D_{eff} 은 강우 유효 경로 길이이고, r 은 유효 경로 감쇠 계수, R_0 는 특성 길이이며 강우 감쇠 측정데이터로부터 유도된다. R 은 레이더의 탐지거리이다. 식 (13)은 최종 강우에 의한 각 주파수별 신호 감쇠를 예측하기 위한 관계식이다.

$$A_R = aW^b \times D_{eff} \text{ [dB]} \tag{13}$$

여기서 A_R 은 강우 감쇠이고, 표 9와 같이 연평균 시간율 1.0 ~ 0.01%일 때 평균 강우 강도 W는 2.0 ~ 100mm/hr의 값을 갖는다. 표 10은 연평균 시간율, 평균 강우 강도 대비 탐지거리 40 ~ 100km로 가정하였을 때 국제전기통신연합(ITU) 및 한국정보통신기술협회(TTA) 기준을 적용하여 강우 유효 경로 길이 D_{eff} 에 대한 각 주파수 대역별 강우에 의한 감쇠 A_R 을 계산하였다.

표 10. 탐지거리에 따른 주파수별 신호 감쇠량
Table 10. Rain Attenuation of Detection Range

주파수 대역	연평균 시간율 %	ITU 기준 탐지거리 R에 따른 강우 감쇠 A_R [dB]			
		R : 40km	R : 60km	R : 80km	R : 100km
L 대역	1.0	0.006	0.007	0.008	0.008
	0.1	0.031	0.034	0.036	0.037
	0.01	0.070	0.075	0.077	0.079
S 대역	1.0	0.033	0.037	0.039	0.041
	0.1	0.225	0.247	0.260	0.268
	0.01	0.648	0.692	0.716	0.731
C 대역	1.0	0.103	0.114	0.121	0.125
	0.1	0.966	1.061	1.115	1.151
	0.01	3.513	3.749	3.880	3.962
X 대역	1.0	0.583	0.647	0.685	0.710
	0.1	5.152	5.656	5.948	6.137
	0.01	17.99	19.20	19.86	20.29

주파수 대역	연평균 시간율 %	TTA 기준 탐지거리 R에 따른 강우 감쇠 A_R [dB]			
		R : 40km	R : 60km	R : 80km	R : 100km
L 대역	1.0	0.018	0.020	0.022	0.022
	0.1	0.063	0.068	0.070	0.072
	0.01	0.074	0.077	0.078	0.079
S 대역	1.0	0.117	0.130	0.137	0.142
	0.1	0.558	0.600	0.623	0.638
	0.01	0.815	0.842	0.856	0.865
C 대역	1.0	0.448	0.495	0.523	0.541
	0.1	2.901	3.118	3.240	3.317
	0.01	5.148	5.316	5.405	5.459
X 대역	1.0	2.441	2.696	2.845	2.943
	0.1	14.96	16.08	16.71	17.11
	0.01	25.68	26.52	26.96	27.23

강우에 의한 주파수별 신호 감쇠는 L 대역에서 C 대역으로 주파수가 높아지고, 탐지거리가 증가하여도 강우 감쇠의 변화는 크지 않다. 반면에 X 대역에서는 탐지거리가 증가할수록 강우에 의한 감쇠도 급격하게 감쇠가 증가함으로 강우에 의한 감쇠가 레이더 시스템에 얼마나 영향을 미치는지 고려해야 한다. 그러므로, 강우에 의한 각 주파수 대역별 신호의 감쇠가 레이더 시스템의 품질 유지에 요구되는 신뢰도를 어떻게 설정하는지가 중요한 요소이다. 이를 신뢰도 대비 비가용도로 나타낸다. 비가용도는 연평균 시간율을 의미한다. 레이더 시스템의 비가용도 P를 1.0%에서 0.01%로 가변시키고, 탐지거리 R을 40 ~ 100km로 고정일 때 국제전기통신연합(ITU) 기준 비가용도 P가 1.0%일 때 최소 강우 감쇠는 0.006dB이고, P가 0.01%일 때 최대 강우 감쇠는 20dB로 약 20dB 정도 차이가 발생하였고, 한국정보통신기술협회(TTA) 기준 비가용도 P가

1.0%일 때 최소 강우 감쇠는 0.018dB이고, P가 0.01%일 때 최대 강우 감쇠는 27.23dB로 약 27dB 정도 차이가 발생하였다. 즉, 강우량이 동일할 때 비가용도를 작게 할수록 레이더 시스템 운용 조건이 까다로워짐에 따라 강우에 더 큰 영향을 받는다고 할 수 있다.

3. 주파수별 신호 감쇠

주파수별 신호의 감쇠는 수증기와 산소에 의한 대기 감쇠 A_a 와 강우에 의한 강우 감쇠 A_R 로 나누어진다. 그러므로, 최종 주파수별 신호 감쇠 A_t 는 식 (10)과 식 (12)의 합인 식 (14)와 같다.

$$A_t = A_a + A_R [dB] \tag{14}$$

대기 감쇠는 대기중 균질적 분포로 일정한 감쇠를 가지며, 강우 감쇠는 비균질적 분포로 감쇠의 변화가 일정하다고 할 수 없다. 이로 인해 식 (14)의 A_t 는 주파수에 영향을 받기 때문에 상수값을 가지지만 A_R 는 강우량, 시스템 비가용도 등 다양한 변수로 인해 상수값을 가지는 않는다. 이를 통해 주파수별 신호 감쇠는 수증기 및 산소에 의한 감쇠와 강우 감쇠가 동시에 일어날 수도 있고 혹은 수증기 및 산소에 의한 감쇠만 발생할 수 있음을 알 수 있다. 표 11은 주파수별 레이더 시스템의 비가용도 0.01%, 한국정보통신기술협회(TTA) 기준을 적용하면 더 높은 주파수별 신호 감쇠를 갖지만 지역별 편차를 고려하여 국제전기통신연합 기준 평균 강우 강도 42mm/hr를 기준으로 최소한의 주파수별 신호 감쇠가 분석되었다.

표 11. 탐지거리에 따른 주파수별 신호 감쇠
Table 11. Atmospheric Attenuation of Detection Range

주파수 대역	탐지거리 R 대비 주파수별 신호 감쇠 A_t [dB]			
	R : 40km	R : 60km	R : 80km	R : 100km
L 대역	0.416 ~ 0.476	0.624 ~ 0.714	0.832 ~ 0.952	1.04 ~ 1.19
S 대역	0.552 ~ 0.982	0.828 ~ 1.468	1.01 ~ 1.87	1.38 ~ 2.45
C 대역	0.64 ~ 2.55	0.96 ~ 3.83	1.28 ~ 5.11	1.60 ~ 6.39
X 대역	1.04 ~ 9.15	1.56 ~ 13.66	2.08 ~ 18.31	2.60 ~ 22.8

국제전기통신연합인 Rec. ITU-R P. 676, P. 837, P. 838 및 P. 530에서 제공하는 신뢰성 높은 데이터로 환경 요인에 따른 주파수별 감쇠 인자의 영향성을 분석한 결과 레이더에서 사용되는 각 주파수별 신호 감쇠는 최소 0.416 ~ 22.8dB 이상의 신호 감쇠가 발생하는 것으로 판단된다. 특히, X 대역 이상에서는 동일한 탐지거리에서도 신호 감쇠가 8.11 ~ 20.2dB의 차이가 발생할 수 있음을 분석되었다. 이를 통해 주파수 대

역이 L 대역에서 X 대역으로 높아질수록 자유공간손실 뿐만 아니라 집중호우 등과 같은 급변하는 환경 요인에 의한 신호 감쇠를 고려해야 한다. 표 12는 식 (6)을 이용하여 탐지거리 대비 자유공간손실과 수증기, 산소 및 강우에 의한 감쇠 L_t 를 적용한 결과이다.

표 12. 탐지거리에 따른 주파수별 총 신호 감쇠
Table 12. Total Attenuation of Detection Range

주파수 대역	탐지거리 R 대비 자유공간손실 및 수증기, 산소, 강우에 의한 신호 감쇠 L_t [dB]			
	R : 40km	R : 60km	R : 80km	R : 100km
L 대역	261.416	268.624	273.832	277.04
	~	~	~	~
S 대역	261.476	268.714	273.952	277.99
	273.552	280.928	286.110	290.380
C 대역	~	~	~	~
	273.982	281.568	286.970	291.450
X 대역	280.74	288.06	293.38	297.60
	~	~	~	~
X 대역	282.65	290.93	297.21	302.39
	290.04	297.56	303.08	307.50
	~	~	~	~
	298.15	309.66	319.31	327.70

표 2의 자유공간손실만 고려했을 경우보다 수증기, 산소 및 강우에 의한 감쇠를 고려하면 레이더의 성능인 탐지거리 감소가 L 대역에서는 최소 8%, X 대역에서는 70% 이상 감소하는 것으로 예측되며, 레이더의 치명적인 약점이 될 수가 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 수증기, 산소 및 강우에 의한 레이더 주파수 대역별 감쇠 영향성을 분석하였으며, 탐지거리 대비 대기 감쇠인 수증기 및 산소에 의한 감쇠는 L 대역에서 최소 0.416dB 이하, X 대역에서는 2.6dB 이하였으며, 강우에 의한 감쇠는 L 대역에서 최소 0.06dB 이하, X 대역에서는 20.2dB로 최종적으로 수증기, 산소 및 강우에 의한 감쇠는 L 대역에서 최소 0.416dB 이하, X 대역에서는 22.8dB로 나타났다. 결론적으로 L, S, C 대역에서 대기 및 강우 감쇠는 미미하며, X 대역에서는 감쇠의 영향성이 큰 것으로 판단된다. 이는 X 대역에서 사용하는 레이더 시스템의 경우 강우에 신호 감쇠 영향성이 크며, 목표하고자 하는 레이더 시스템의 성능을 100% 발휘할 수 없음을 의미한다. 향후 다양한 조건에서의 강우의 영향성에 대한 연구가 필요하다.

References

- [1] C. A. Levis, J. T. Johnson and F. L. Teixeira, "Radiowave Propagation: Physics and Applications," John Wiley & Sons, Inc. Canada, 2010.
- [2] J. H. Lee, Y. S. Choi and J. M. Kim, "Prediction of Rain Attenuation using the Comparison to Rain Rate Distributions," Journal of Korean Institute of Communications and information Sciences, Vol. 16, No. 1, pp. 309-314, 1997.
- [3] H. S. Lee and C. H. Shin, "Rainfall-Intensity Distribution for an Analysis of the Effects of Rain Attenuation," Journal of Korean Institute of Communications and information Sciences, Vol. 23, No. 4, pp. 1006-1015, 1998.
- [4] "Attenuation by Atmospheric Gases in the Frequency Range 1-350GHz," Rec. ITU-R P.676-1, 1992.
- [5] "Characteristics of Precipitation for Propagation Modelling," Rec. ITU-R P.837-1, 1994.
- [6] "Specific Attenuation Model for Rain for Use in Prediction Methods," Rec. ITU-R P.838-1, 1999.
- [7] "Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems," Rec. ITU-R P.530-11, 2005.
- [8] "Electronic Warfare and Radar Systems Engineering Handbook," Naval Air Warfare Center Weapons Division. U.S.A, 2013.
- [9] A. Y. Abdulrahman, T. A. Rahman, S. K. A. Rahim and M. R. U. Islam, "Empirically derived path reduction factor for terrestrial microwave links operating at 15 Ghz in Peninsula Malaysia," Journal of Electromagnetic Waves and Applications, Vol. 25, No. 1, pp. 23-37, 2011.
- [10] M. Marzuki, T. Kozu, T. Shimomai, W. L. Randeu, H. Hashiguchi and Y. Shibagaki, "Diurnal variation of rain attenuation obtained from measurement of raindrop size distribution in equatorial Indonesia," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 57, No. 4, pp. 1191-1196, Apr. 2009.
- [11] S. Shrestha and D.-Y. Choi, "Rain attenuation over terrestrial microwave links in South Korea," IET Microwaves Antennas & Propagation, Vol. 11, No. 7, pp. 1
- [12] I. Shayea, T. A. Rahman, M. H. Azmi, M. R. Islam, "Real Measurement Study for Rain Rate and Rain Attenuation Conducted Over 26GHz Microwave 5G Link System in Malaysia." IEEE Access, Vol. 6, pp. 19044 - 19064, March. 2018.
- [13] "Reginal rainfall-rate distribution for designing radio Communication Links in Korea,"TTAK.KO-06.0122/R1, 2013.