

환경 요인에 의한 레이더 주파수 대역별 감쇠 영향성 분석

김 태 영^{*,1)}

¹⁾ 한화시스템(주) 감시정찰사업부

An Analysis of Issues Related to Attenuation by Atmospheric Factors in the Frequency Bands for Radar Systems

Taeyoung Kim^{*,1)}

¹⁾ Department of Intelligent Surveillance and Reconnaissance, Hanwha Systems, Korea

(Received 5 September 2024 / Revised 28 October 2024 / Accepted 6 November 2024)

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 at least 0.416 dB in the L band and 2.6 dB in the X band. The attenuation by rainfall is at least 0.06 dB in the L band and 20.2 dB in the X band. Finally, the attenuation by atmospheric factors is at least 0.416 dB in the L band and 22.8 dB 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 : Attenuation by Atmospheric Gases(대기 감쇠), Attenuation by Rainfall(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 추적

하는 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 대표적으로 레이더의 출력전력을 증가하면 증가할수록 발열이 증가하게 되며 그로 인한 냉각 구조도 복잡하게 되어 레이더의 소형화 및 경량화가 불가능할 수 밖에 없다. 또한 고려되어야 할 사항으로 엘리노 및 라니냐와 같은 전세계적으로 급격히 변화하

* Corresponding author, E-mail: ty2460.kim@hanwha.com
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

는 이상 기후로 집중호우의 발생 빈도 및 연중 강수량 증가로 인해 무선 전파를 사용하여 표적을 탐지 추적하는 레이더 체계에서는 대기중 신호 감쇠 영향성이 점점 증가하고 있다. 이로 인해 클러터 증가, 탐지 거리 축소 등과 같은 치명적인 문제점이 증가하는 추세이다. 일반적으로 높은 주파수일수록 파장($\lambda=c/f$, c : 빛의 속도, f : 주파수)이 짧아 강한 직진성을 가져 대기중 전자파의 전파는 자유공간상의 손실뿐만 아니라 수증기나 산소 기체, 강우(0.01 cm 이상)와 같은 고체성 입자들에 의한 산란 및 흡수에 의한 대기중 감쇠가 크게 일어난다. 대기중 감쇠 요소는 크게 수증기나 산소 기체에 의한 대기 감쇠와 강우와 같은 강우 감쇠로 나누어진다. 대기 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 반경, 빗방울 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]. 다시 말하면, 감쇠에 가장 큰 영향을 주는 것은 강우에 의한 것이며, 감쇠 정도는 강우의 입자 직경 및 파장과의 관계에서 영향을 주어 레이더의 탐지 추적 특성에 영향을 미칠 수 있다.

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

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 있

으며, 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] 및 Rec. ITU-R P. 530(맑은 공기와 강우 시 전파 효과에 대한 예측 방법)^[7]에서 제공하는 신뢰성 높은 데이터로 환경 요인에 따른 주파수별 감쇠 인자의 영향성을 분석하고, 이를 통해 레이더 설계 단계부터 주요 주파수 대역별 환경 요인에 의한 대기 감쇠 및 강우 감쇠 특성을 예측할 수 있는 모델을 과학적 및 체계적으로 분석하여 감쇠에 대한 적절한 방안을 제시하고자 한다.

2. 레이더 방정식^[8]

2.1 레이더 방정식의 감쇠 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.

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

여기서 P_r 는 수신전력, P_t 는 송신전력, G_t 는 송신 안테나 이득, 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.

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

식 (2)를 dB로 변환하면 식 (3)과 동일하다.

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

식 (3)의 우측 4번째항은 송신시 자유공간손실, 5번째항은 표적이득, 6번째항은 표적으로부터 수신시 자유공간손실이다. 식 (3)을 단순화하면 식 (4)와 같다.

$$10\log P_r = 10\log P_t + 10\log G_t + 10\log G_r + 10\log G_o - 2L_a \quad (4)$$

여기서 L_a 는 레이더 신호에 대한 자유공간손실이며, $L_a = 92.45 + 20\log f_{GHz} + 20\log R_{km}$ 의 값을 갖는다. Table 1에서 L_a 는 거리, 주파수에 따라 변경된다.

Table 1. Free space loss^[8]

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

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

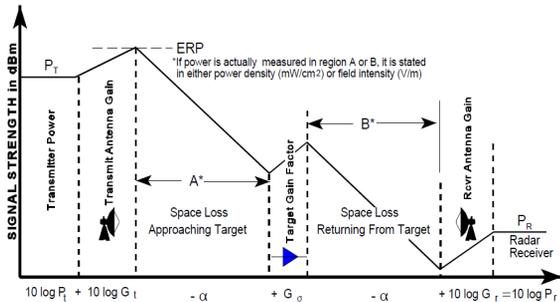


Fig. 1. Visualization of two-way radar equation^[8]

Table 2. Free space loss of two-way radar

주파수 대역	탐지거리 R 양방향 자유공간손실 L_a [dB]			
	R : 40 km	R : 60 km	R : 80 km	R : 100 km
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

Table 2는 Fig. 1의 주파수 대역별 레이더의 탐지거리 R에 따른 양방향 자유공간손실 L_a 를 계산하였다.

2.2 주파수 대역별 환경에 의한 감쇠 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 대기 가스 성분에 의한 감쇠
- ② 비, 안개, 이슬 등에 의한 감쇠

①의 경우 전자파의 전파에 있어 수증기나 산소 분자 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.

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

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 변화하여 이러한 감쇠를 대기 감쇠라고 한다. 반면에 강우는 비균질적인 분포를 보이며, 강우의 범위, 크기에 따라 변화하여 이를 강우 감쇠라고 한다. 본 논문에서는 식 (5)의 자유공간손실과 환경 요인에 의한 손실 L_t 에 대해 분석하면 식 (6)과 같다.

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

2.2.1 대기 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 레이더가 탐지 추적하는 거리로 추정할 수 있다. Fig. 2는 KAMD 구성도이다.

Table 3은 레이더 신호의 감쇠 요인과 밀접한 지구 대기권의 특징이다. 대류권은 지표에서 최대 20 km까지이며 고도에 따라 온도가 변화하며, 질소 78 %, 산

소 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.

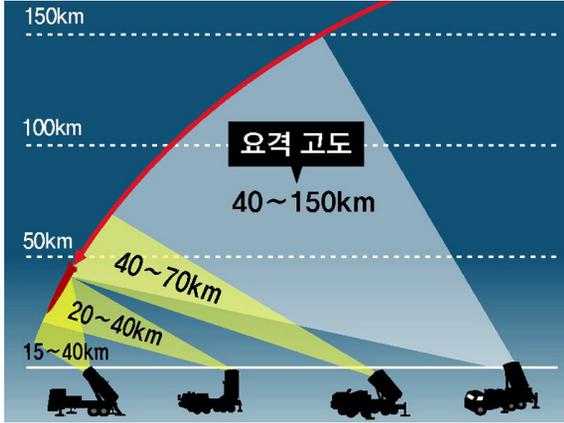


Fig. 2. Korea air and missile defense

Table 3. 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

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. Rec. ITU-R P.676-1의 대기감쇠 모델^[4]에 따르면 지구의 평균 대기 상태(Standard air condition)인

대기압 1,013 hPa, 온도 15 °C, 수증기 밀도 7.5 g/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 350 GHz까지이다^[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 농도, 일반적으로 7.5 g/m³이고, f 는 주파수, 단위는 GHz이다.

산소에 의한 감쇠 A_o 는 주파수가 57 GHz 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 57 GHz 이상일 때 식 (9)와 같다^[4].

$$A_o = [3.79 \times 10^{-7}f + \frac{0.265}{(f - 63)^2 + 1.59} + \frac{0.028}{(f - 118)^2 + 1.47}](f + 198)^2 \times 10^{-3} \text{ [dB/km]} \quad (9)$$

레이더 신호에 따른 수증기와 산소에 의한 대기 감쇠 A_a 는 식 (7)에서 (9)를 이용하여 식 (10)과 같이 구할 수 있다^[4]. 여기서 R 은 탐지거리이다.

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

Table 4. Atmospheric attenuation

주파수 대역	수증기 A_w 에 의한 감쇠[dB/km]	산소 A_o 에 의한 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

Table 4는 식 (7) ~ (9)를 이용하여 주파수별 수증기 A_W 에 의한 거리당 최대 감쇠는 0.006 dB/km 이하이며, 산소 A_O 에 의한 거리당 최대 감쇠는 0.007 dB/km 이하이다. Fig. 3은 수증기 및 산소에 의한 감쇠 그래프이다.

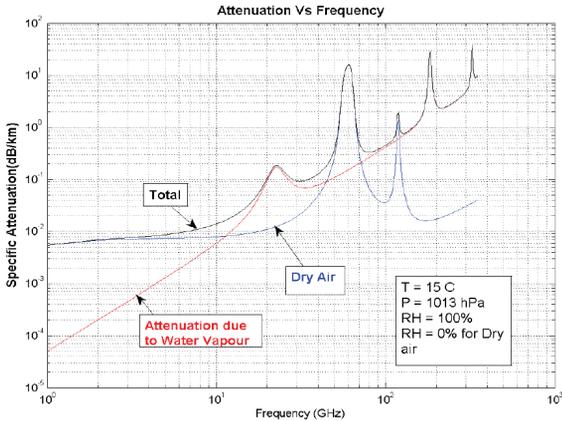


Fig. 3. Prediction of atmospheric attenuation^[4]

Table 5는 Table 4와 식 (10)을 기반으로 주파수별 레이더 신호의 탐지거리 R에 따른 대기 감쇠 A_d 이며, 100 km 지점에서 레이더 신호의 대기중 최대 감쇠량은 L 대역에서 1.04 dB, X 대역에서 2.6 dB 이하였다.

Table 5. Atmospheric attenuation by detection range

주파수 대역	탐지거리 R에 따른에 의한 대기 감쇠 A_d [dB]			
	R : 40 km	R : 60 km	R : 80 km	R : 100 km
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 강우 감쇠

환경 요인에 의한 레이더 신호의 감쇠에서 가장 큰 영향을 주는 것은 강우에 의한 요인이다. 특히 지속적인 강우보다 순간적으로 내리는 집중 호우가 레이더 신호의 손실에 더 많은 영향을 준다. 강우에 의한 감쇠 A_R 는 대기 감쇠와는 달리 비균질적 분포로 시간당 강우량(mm/hr)으로 감쇠량을 계산하며, 강우에 의

한 감쇠를 예측 및 분석하기 위해서는 평균 강우 강도 W와 a, b 값의 관계식 (11)을 이용하여 강우에 의한 감쇠 A_R 를 구할 수 있다^[6].

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

여기서 A_R 은 강우에 의한 감쇠, W는 평균 강우 강도, a, b는 주파수와 온도의 함수이다.

평균 강우 강도는 Rec. ITU-R P. 837-1에 권고된 전세계 지역의 강우 분포도에서 대한민국의 강우 모델인 K 지역을 적용하여 평균 강우 강도를 구할 수 있다. Fig. 4는 전세계 지역의 강우 분포도이다.

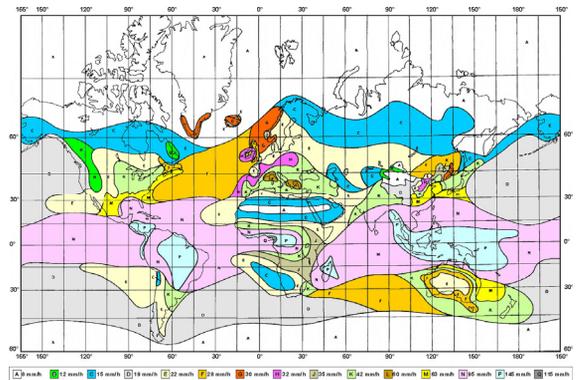


Fig. 4. ITU-R rain regions, Korea and world^[5]

먼저 강우에 의한 감쇠를 예측하기 위해서는 레이더 시스템의 비가용도를 어떻게 설정하느냐가 중요하다. 비가용도는 환경 요인에 의해 운용하지 못하는 경우를 년 운용시간의 백분율이며, 여기서는 0.01 %로 가정하였다. 비가용도 0.01 %를 보장하려면 Rec. ITU-R P. 837-1에 권고된 대한민국의 평균 강우 강도는 42 mm/hr 가 되며, Table 6은 비가용도 1 ~ 0.001 %로 변경에 따른 평균 강우 강도를 나타내었다.

Table 6. Non-availability vs average rain^[5]

강우 분포 지역	비가용도 P [%]	평균 강우 강도 W [mm/hr]
K 지역	1.0	2
	0.1	12
	0.01	42
	0.001	100

Table 7은 Rec. ITU-R P. 838-1에 권고된 각 주파수 대역의 수직편파 및 수평편파에 대한 a, b 값이다.

Table 7. Coefficients for 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

Table 7의 주파수와 온도의 함수 a, b 및 식 (11)를 이용하여 Table 8과 같이 평균 강우 강도 W에 의한 거리당 주파수 대역별 편파 감쇠를 계산할 수 있다.

Table 8. Polarization attenuation by average rain

주파수 대역	평균 강우 강도 W [mm/hr]	수평 편파 [dB/km]	수직 편파 [dB/km]
L 대역	2	0.0003	0.0002
S 대역		0.0014	0.0012
C 대역		0.004	0.003
X 대역		0.024	0.021
L 대역	12	0.0014	0.0012
S 대역		0.010	0.008
C 대역		0.04	0.003
X 대역		0.24	0.20
L 대역	42	0.004	0.003
S 대역		0.04	0.03
C 대역		0.23	0.17
X 대역		1.19	0.99
L 대역	100	0.010	0.007
S 대역		0.11	0.08
C 대역		0.72	0.52
X 대역		3.60	2.99

Table 8에서 각 레이더 주파수 대역에 대한 평균 강우 강도가 변화될 때 수평편파, 수직편파 둘 다 L, S, C 대역에서는 변화가 작으나 X 대역에서는 거리당

강우에 의한 감쇠가 증가함을 알 수 있다. 즉, 강우 감쇠는 집중 호우와 같이 강우가 일시적으로 집중될 때 X 대역에서의 주파수 감쇠가 증가함을 의미한다. Rec. ITU-R P. 530-11에서는 강우에 의한 감쇠를 정확히 구하기 위해 평균 강우 강도뿐만 아니라 강우 범위를 적용하였다. 식 (12)는 강우 범위를 적용한 강우에 의한 감쇠이다^[7]. Fig. 5는 강우 분포도이다.

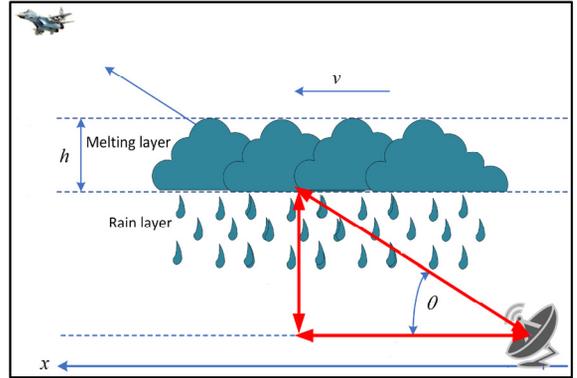


Fig. 5. Rain attenuation path

$$A_R = a W^b \times R \times r \text{ [dB]} \tag{12}$$

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

여기서 A_R 은 강우 감쇠이고, Table 6과 같이 비가용도 1.0 ~ 0.001 %일 때 평균 강우 강도 W는 2.0 ~ 100 mm/hr의 값을 갖는다. r은 유효 경로 감쇠 계수, R_0 는 특성 길이이며 강우 감쇠 측정데이터로부터 유도된다. R은 강우 범위 및 레이더의 탐지거리이다.

Table 9. Rain attenuation by detection range

주파수 대역	탐지거리 R에 따른 강우 감쇠 A_R [dB]			
	R : 40 km	R : 60 km	R : 80 km	R : 100 km
L 대역	0.06	0.09	0.12	0.15
S 대역	0.43	0.64	0.86	1.07
C 대역	1.91	2.87	3.83	4.79
X 대역	8.11	12.1	16.23	20.2

비가용도 0.01 %, 평균 강우 강도 42 mm/hr 및 탐지거리 40 ~ 100 km로 가정하였을 때 Table 9와 같이

각 주파수(수평편파) 대역별 강우에 의한 감쇠를 계산하였다. 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 감쇠를 고려해야 한다.

X 대역에서는 레이더 시스템의 비가용도를 어떻게 설정하는지가 중요한 요소이다. 그러므로 레이더 시스템의 비가용도를 0.1 %에서 0.0001 %로 가변시키고, X 대역의 탐지거리를 100 km로 고정일 때 식 (13)을 이용하여 비가용도 변화에 따른 강우 감쇠 A_p 의 감쇠 그래프는 Fig. 6과 같다^[7].

$$A_p = A_{0.01} C_1 P^{-(C_2 + C_3 \log_{10} P)} [dB] \quad (13)$$

여기서 P는 비가용도, f는 주파수이다.

$$C_0 = \begin{cases} 0.12 + 0.4 [\log_{10}(f/10)^{0.8}], & f \geq 10GHz \\ 0.12, & f < 10GHz \end{cases}$$

$$C_1 = (0.07^{C_0})(0.12^{(1-C_0)})$$

$$C_2 = 0.855C_0 + 0.546(1 - C_0)$$

$$C_3 = 0.139C_0 + 0.043(1 - C_0)$$

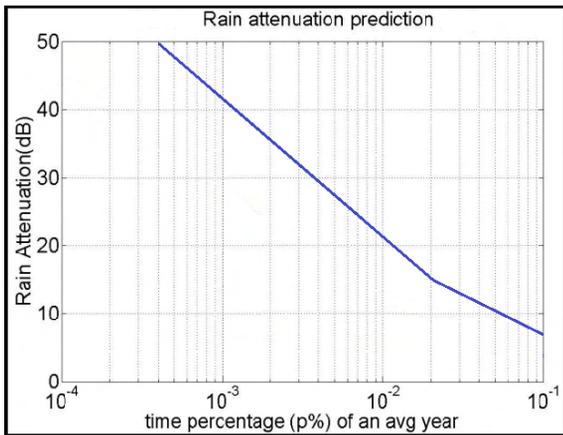


Fig. 6. Rain attenuation vs time percentage

비가용도 P가 0.1 %일 때 강우 감쇠 A_p 는 7.6 dB이고, P가 0.001 %일 때 강우 감쇠 A_p 는 41 dB로 33 dB 정도 차이가 발생하였다. 즉, 강우량이 동일할 때 비가용도를 작게 할수록 시스템 운용 조건이 까다로워짐에 따라 강우에 더 큰 영향을 받는다고 할 수 있다.

3. 환경 요인에 의한 신호 감쇠

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

$$A_t = A_a + A_R [dB] \quad (14)$$

대기 감쇠는 대기중 균질적 분포로 일정한 감쇠를 가지며, 강우 감쇠는 비균질적 분포로 감쇠의 변화가 일정하다고 할 수 없다. 이로 인해 식 (14)의 A_a 는 주파수에 영향을 받지 않음에 상수값을 가지지만 A_R 는 강우량, 시스템 비가용도 등 다양한 변수로 인해 상수값을 가지지 않는다. 이를 통해 환경 요인에 의한 신호 감쇠는 대기 감쇠와 강우 감쇠가 동시에 일어날 수도 있고 혹은 대기 감쇠만 발생할 수 있음을 알 수 있다. Table 10은 시스템의 비가용도 0.01 %, 평균 강우 강도 42 mm/hr를 기준으로 최종 환경 요인에 의한 신호 감쇠를 예측할 수 있다.

Table 10. Atmospheric and rain attenuation

주파수 대역	탐지거리 R 대비 환경 요인에 의한 신호 감쇠 A_t [dB]			
	R : 40 km	R : 60 km	R : 80 km	R : 100 km
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 ~ 22.8 dB 이상의 신호 감쇠가 발생하는 것으로 판단된다. 특히, X 대역 이상에서는 동일한 탐지거리에서도 신호 감쇠가 8.11 ~ 20.2 dB의 차이가

발생할 수 있음을 분석되었다. 이를 통해 주파수 대역이 L 대역에서 X 대역으로 높아질수록 자유공간손실뿐만 아니라 집중호우 등과 같은 급변하는 환경 요인에 의한 신호 감쇠를 고려해야 한다. Table 11은 식(6)을 이용하여 탐지거리 대비 자유공간손실과 환경 요인에 의한 감쇠 L_r 를 적용한 결과이다.

Table 11. Total attenuation

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

Table 2의 자유공간손실만 고려했을 경우보다 환경 요인에 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 0.416 dB 이하, X 대역에서는 2.6 dB 이하였으며, 강우에 의한 감쇠는 L 대역에서 최소 0.06 dB 이하, X 대역에서는 20.2 dB로 최종적으로 환경 요인에 의한 감쇠는 L 대역에서 최소 0.416 dB 이하, X 대역에서는 22.8 dB로 나타났다. 결론적으로 L, S, C 대역에서 대기 및 강우 감쇠는 미미하며, X 대역에서는 감쇠의 영향성이 큰 것으로 판단된다. 향후 다양한 조건에서의 환경 요인에 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 1-350 GHz," 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. 1031-1039, Jun. 2017.