

# 전자파 기초이론 연구 (강우에 의한 감쇠특성)

이 경 회



## 요 약 문

주파수가 높아질수록 낮은 주파수대에서는 무시될 수 있던 현상들이 두드러져 통신의 품질에 영향을 미치게 된다. VHF 대 이상의 전파가 대류권을 통과해갈 때, 강우, 눈, 안개 등에 의한 산란과 흡수 효과는 주파수가 높아질수록 더 커지게 된다. 특히 강우입자에 의한 영향은 전파강도의 감쇠량을 추정하는 데 매우 중요한 역할을 한다.

본 보고서에서는 전파전파특성에 미치는 대기가스의 영향에 관한 이론들을 기술한다. 또한 강우의 특성과 통계적 성질에 대해서도 기술하였다. 그리고 주파수 내역에 따른 전파전파특성 실험계획과 수행상황을 보고하고자 한다.

## A B S T R A C T

As frequency turns higher cycle on the incidental hazards which are not found in lower frequency range have much effect on the quality of communications. When radio wave above VHF passes through troposphere, the effect of absorption and scattering caused by rainfall, snow, fog etc. seriously affects communications as frequency increases. Especially precipitation is very important for an estimate of attenuation.

In this report, it describes a theoretical survey on the effect of atmospheric gases in the propagation of radio wave. Characteristics, and statistical features of the precipitation are also the subjects of study. It covers a series of plans to experiment the characteristics of radio wave propagation according to frequency band.



## 목 차

제1장 서 언	181
제2장 대기가스	181
1. 대기가스의 기본적인 성질	181
2. 산소분자에 의한 흡수	184
3. 수증기분자에 의한 흡수	185
4. 경로감쇠와 등가고	186
제3장 강우의 특성 및 통계적 성질	188
1. 강우의 특성	188
2. 빗방울 산란 이론	191
3. 강우의 구조와 통계적 성질	195
제4장 강우이외의 대기입자에 의한 감쇠특성	196
제5장 강우에 의한 전파전파 감쇠특성 연구	198
1. 주파수 대역별 전파전파 측정 시스템	198
2. 일본의 방송위성 BS 의 전계강도 측정	199
제6장 결 론	203
참고문헌	205



## 제1장 서 언

전파를 이용하는 통신수요가 급증함에 따라 기존의 사용 주파수대에서의 통신방식의 다양화와 보다 높은 주파수 대역의 통신 기술 개발을 꾀함으로써 전파 자원 부족현상을 해결하고자 하는 노력이 전세계적으로 진행중이다.

전파연구소에서는 이러한 미이용 주파수대의 이용기술 개발 및 응용시스템 개발에 기초자료로 사용할 수 있는 전파전파특성을 파악하기 위하여 강우에 의한 감쇠특성을 조사하고 있다.

대류권의 강우, 대기가스 등은 고주파 영역에서 전파에너지의 흡수, 산란을 유발하므로 먼저 강우, 대기가스의 특성을 이해하고 그 세기에 따른 전파전파에 미치는 영향을 측정 분석함으로써, 기초자료로서 가치를 갖게 된다.

따라서 본 연구에서는 대기가스와 강우의 특성에 대해서 현재까지 밝혀진 이론을 수집, 검토하였으며, 12 GHz 대역 주파수에 대한 강우감쇠량을 측정할 수 있는 시스템을 구축, 운용 결과를 제시하고자 한다. 본 연구 결과 향후 측정 시스템의 개선방안, 효율적인 분석방법의 도입 등이 가능할 것으로 예상되며 94년도에는 데이터를 계속 수집하며 이를 분석하여 전파의 강우감쇠특성을 직접 알아 보고자 한다.

## 제2장 대기가스

### 1. 대기가스의 기본적 성질

지표의 건조대기는 질소(78.084%), 산소(20.946%), 아르곤(0.934%)의 주성분과 이산화탄소 등의 혼합분자들로 된 미량성분으로 형성되어 있다. 이 혼합기체에 그 함유량의 변화가 큰 수증기가 첨가된 것이 지구대기이다. 각각의 분자들에는 분자구조에 따른 독특한 흡수특성이 있어서 전파가 대기를 통해 진행해 갈 때 특정

대역의 흡수가 일어난다. 표 1에 지구대기의 흡수선과 주파수를 표시하였다.<sup>(1)</sup>

이들 대기성분 중에서 마이크로파대 이상의 전파전파에 문제가 되는 것은 수증기와 산소이다. 그림 1은 주파수와, 주파수에 따라 대기가스에 의해 흡수되는 정도를 나타내는 흡수계수와 상관관계를 나타낸 것이다.<sup>(2)</sup>

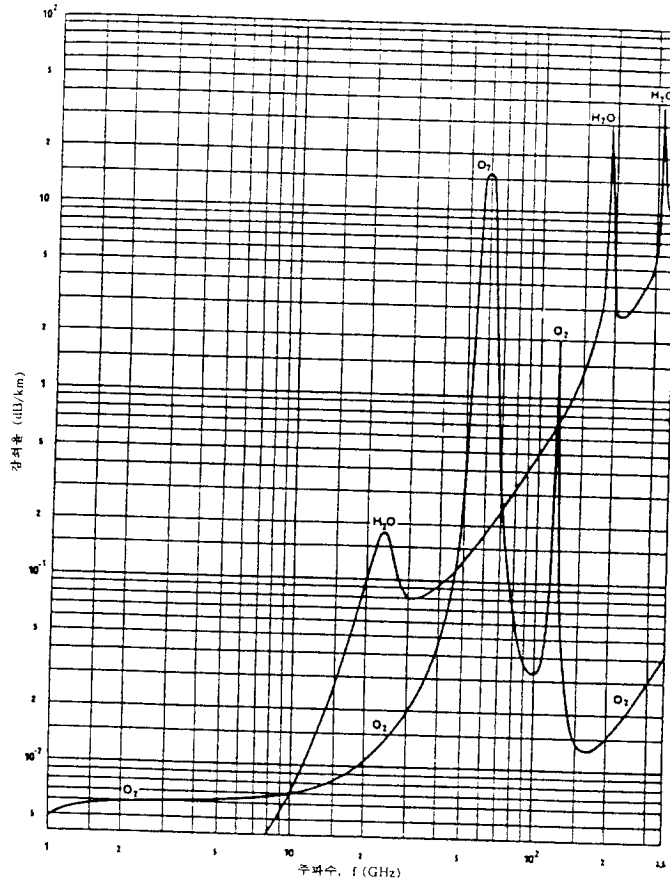


그림 1. 대기가스에 의한 감쇠

압력 : 1013mb

온도 : 15 °C

수증기 밀도 : 7.5 g/m<sup>3</sup>



주파수(GHz)	대역폭(MHz)	측 정
1.4 근처	100	토양습기 ; 염도
2.7 근처	60	염도 ; 토양습기
5 근처	200	강어귀 온도
6 근처	400	해양온도
11 근처	100	강우 ; 눈 ; 호수얼음 ; 바다상태
15 근처	200	수증기 ; 비
18 근처	200	강우 ; 바다상태 ; 해양얼음 ; 수증기
21 근처	200	수증기 ; 유동수
22.235	300	수증기 ; 유동수
24 근처	400	수증기 ; 유동수
30 근처	500	해양얼음 ; 수증기 ; 기름유출 ; 구름 ; 유동수
37 근처	1000	강우 ; 눈 ; 해양얼음 ; 기름유출 ; 구름
55 근처	250 배수 *	온도
90 근처	6000	구름 ; 기름유출 ; 얼음 ; 눈
100.49	2000	아산화질소
110.80	2000	오존
115.27	2000	일산화탄소
118.70	2000	온도
125.61	2000	아산화질소
150.74	2000	아산화질소
164.38	2000	염소산화물
167.20	2000	염소산화물
175.86	2000	아산화질소
183.31	2000	수증기
184.75	2000	오존
200.98	2000	아산화질소
226.09	2000	아산화질소
230.54	2000	일산화탄소
235.71	2000	오존
237.15	2000	오존
251.21	2000	아산화질소
276.33	2000	아산화질소
301.44	2000	아산화질소
325.10	2000	수증기
345.80	2000	일산화탄소
364.32	2000	오존
380.20	2000	수증기

\* 각각이 250 MHz 대역폭인 여러 대역들

표 1. 지구대기의 흡수선

이 외에 일산화탄소, 일산화질소, 오존, 암모니아, 이산화황, 황화수소, 포름알데히드, 이산화질소 등의 미량분자도 미리파대의 흡수선을 갖는다. 그러나 이들 분자들은 공기중의 함유량이 작고, 대류권에서는 수증기와 산소의 폭넓은 흡수스펙트럼에 가려서 그 영향이 무시될 수 있다. 그렇지만 이러한 미량성분의 흡수선은 전파천문과 지구환경의 모니터에서는 중요한 의미를 갖는다.

## 2. 산소분자에 의한 흡수선

산소분자의 스펙트럼에 대해서는 수많은 이론적 및 실험적 연구가 수행되어 왔다. 산소분자는 50 - 70 GHz 사이에 근접된 다수의 흡수선으로 이루어지는 흡수대와 118.75 GHz 대의 격리된 흡수선을 갖고 있으며, 그 외에 서브미리파대에 회전준위간의 자기쌍극자 천이에 의한 흡수 스펙트럼을 갖고 있다.

산소는 건조한 대기상태(온도: 15 °C, 기압 :1013 mb) 에서 감쇠의 주원인이 되는데 감쇠율의 계산은 다음 식에 의해 얻어진다.

$f < 57$  GHz 인 경우,

$$\gamma_o = \left\{ 7.19 \times 10^{-3} + \frac{6.09}{f^2 + 0.227} + \frac{4.81}{(f-57)^2 + 1.50} \right\} f^2 \times 10^{-3} \quad (1)$$

$63 < f < 350$  GHz 인 경우,

$$\gamma_o = \left\{ 3.79 \times 10^{-7} f + \frac{0.265}{(f-63)^2 + 1.59} + \frac{0.028}{(f-118)^2 + 1.47} \right\} \times (f+198)^2 \times 10^{-3} \quad (2)$$

산소의 흡수대인 50 - 70 GHz 대에서 보여지는 많은 중복된 흡수선은 압력과 높이에 의존하는 복잡한 스펙트럼 구조를 나타낸다. 그림 2는 고도에 따른 산소에 의한 주파수 감쇠율이다.

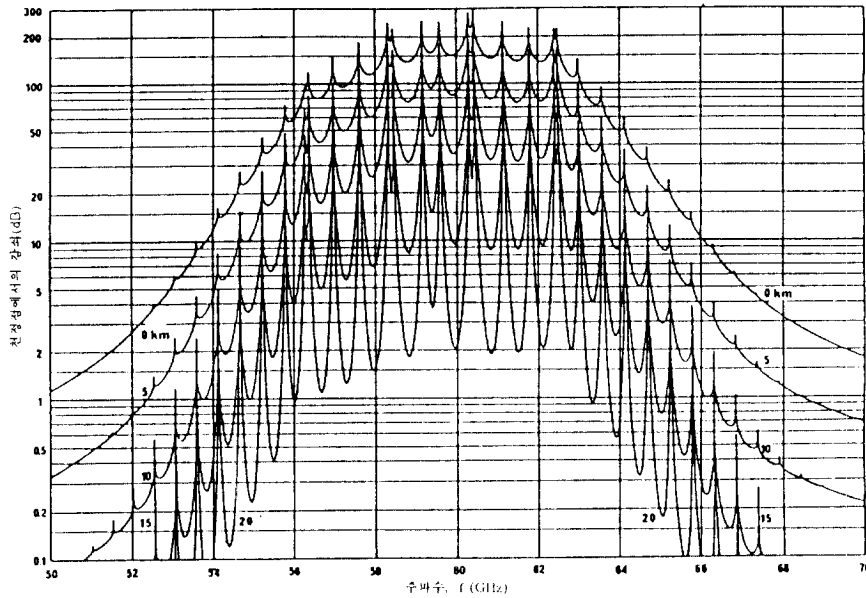


그림 2. 특정 고도에서 본 천정 방향의 산소에 의한 흡수

### 3. 수증기 분자에 의한 흡수

수증기분자는 마이크로파대부터 적외선 영역에 걸쳐 회전준위간의 전기쌍극자 편이에 의한 다수의 흡수선을 갖는다. 22.2 GHz, 183.3 GHz, 그리고 325 GHz의 주파수에서 흡수선을 갖으므로 22 GHz 근방과 120 GHz - 10 THz 대에서의 대기가스에 의한 감쇠는 대부분 수증기에 의해 설명된다. 수증기에 의한 감쇠는 대기중의 수증기량에 의존한다.

대기중의 수증기량은 상대습도  $e$  (%), 수증기압  $P_v$  (mb), 수증기 밀도  $\rho$  (g/m<sup>3</sup>)와 다음의 관계가 성립한다.

$$e = 100 P_v/P_s = 100 \rho/\rho_s \quad (3)$$

$$\rho = 216.7 P_v/T \quad (4)$$

$$\rho_s = 6.1121 \exp\{17.502 \times t/(t+240.97)\} \quad 0 \leq t \leq 50^\circ \quad (5)$$

여기서  $P_s$ 는 포화수증기압,  $\rho_s$ 는 포화수증기 밀도,  $T$ 는 절대온도(K)이다. 수증기 분자에 의한 흡수선은 그림 1에 나타낸 것 외에 서브밀리파, 적외선영역에도 다수의 강

한 흡수선을 갖고 이 흡수선의 일부가 미리파대에서의 감쇠를 초래한다.

기온 15 °C, 기압 1013 mb 일 때,  $f < 350$  GHz에서의 수증기에 의한 흡수계수  $\gamma_v$ (dB/km)는 다음 식으로 근사된다.

$$\gamma_v = \left\{ 0.050 + 0.00219 \rho + \frac{3.6}{(f-222.2)^2 + 8.5} + \frac{10.6}{(f-183.3)^2 + 9.0} + \frac{8.9}{(f-325.4)^2 + 26.3} \right\} \times f^2 \rho \times 10^{-4} \text{ dB/km} \quad (6)$$

여기서  $f$ 는 GHz 단위의 주파수이며  $\rho$ 는  $\text{g/m}^3$  로 표시되는 수증기 밀도이다.

#### 4. 경로감쇠 및 등가고

경로길이  $r_0$  (km)에 걸친 대기에서 전체 가스에 의한 흡수  $A_a$ (dB)는

$$A_a = \int_0^{r_0} \gamma_a(r) dr \quad (7)$$

이고, 여기서 감쇠율은

$$\gamma_a(r) = \gamma_o(r) + \gamma_v(r) \quad (8)$$

이며,  $\gamma_o$  와  $\gamma_v$ 는 각각 건조대기와 수증기의 기여도이다.

지상경로 또는 대지에 근접된 약간의 경사진 경로에 대한 감쇠는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$A_a = \gamma_a r_0 = (\gamma_o + \gamma_v) r_0 \quad (9)$$

수직경로 또는 경사진 경로상의 전체 경로감쇠는 식 (7)을 대기 전체에 걸쳐 적분 하여야 한다.

전파경로가 대기층을 천정방향으로 관통하는 경우 식 (7)은 다음과 같이

전자파 기초이론 연구(186)

된다.

$$r_a = \gamma_{o_0} h_o + \gamma_{w_0} h_w \quad (10)$$

여기서  $\gamma_{o_0}$  와  $\gamma_{w_0}$  는 그림 1에 주어진 지상부근의 산소 및 수증기의 흡수계수이고,  $h_o$  와  $h_w$  는 산소와 수증기의 등가고(equivalent height(km))이다. 이 등가고는 특정 가스에 의한 전 감쇠량과 같아지도록 지표의 대기가 일정한 밀도로 존재한다고 가정한 높이를 말하며, 그 이상은 진공으로 간주한다. 건조대기의 경우 흡수대 이외에서는 산소의 등가고  $h_o$ 는 약 6 km, 수증기의 등가고는 약 2.2 km 이다. 흡수선 근처의 주파수에서는 다음과 같이 주어진다.<sup>(3)</sup>

$$h_o = 6 \text{ (km)} \quad (f < 57 \text{ GHz}) \quad (11)$$

$$h_o = 6 + \frac{40}{(f-118.7)^2 + 1} \quad (63 < f < 350 \text{ GHz}) \quad (12)$$

$$h_w = h_{w_0} \left\{ 1 + \frac{3.0}{(f-22.2)^2 + 5} + \frac{5.6}{(f-183.3)^2 + 6} + \frac{2.5}{(f-325.4)^2 + 4} \right\} \quad (f < 350 \text{ GHz}) \quad (13)$$

여기서  $h_{w_0}$  는 창영역에서의 수증기의 등가고로서,

$$\begin{aligned} h_{w_0} &= 1.6 \text{ km (맑은 날)} \\ &= 2.1 \text{ km (비오는 날)} \end{aligned}$$

이다.

### 제3장 강우의 특성과 구조 및 통계적 성질

#### 1. 강우의 특성

일반적으로 5 GHz 이상의 주파수대의 전파가 대기중을 전파할 때는 비, 눈, 안개, 진눈깨비 또는 얼음 알갱이 같은 대기수상(hydrometeor)에 의해 흡수, 산란되어 감쇠된다. 대기수상중 가장 큰 영향을 미치는 것은 강수입자(precipitation particles)로서 시간당으로 환산된 값(mm/h)으로 나타내어 진다. 비의 경우에는 강우강도(rain rate)라고 하는데 전파전파에 미치는 영향은 다음과 같다.

구름 속의 물방울은 직경이 수  $\mu\text{m}$  이하로써 이것들이 충돌에 의해 수십  $\mu\text{m}$  이상의 물방울이 되어 빗방울로 낙하하기 시작한다. 지상 근처에 도달한 빗방울의 최대 직경은 6mm 정도로, 그 이상이 되면 불안정하기 때문에 낙하도중 작은 물방울로 분열된다. 빗방울의 형태는 크기가 작은 경우(직경 0.34mm 이하) 대체로 구형이며, 크기가 커짐에 따라 구형에서 편평한 회전타원체에 가까운 형태의 빗방울이 된다. 거기서 더 커지면(직경 1-4mm) 밑부분이 더 편평한 모양에서, 중앙부분에 흡이 파진 형태(직경 4mm 이상)가 된다. 그림 3에 실제의 빗방울 모양에 가깝다고 생각되는 계산된 빗방울의 변형형태를 표시하였다.<sup>(4)</sup>

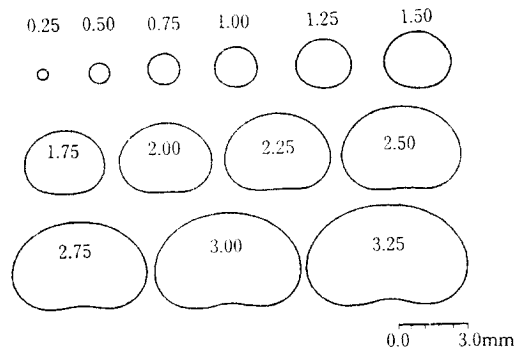


그림 3. 변형 빗방울 형태의 계산 예

표시된 숫자는 등가체적구형 빗방울의 반경임.

대기중을 낙하하는 빗방울은 지상근처에서 중력과 마찰력의 균형에 의해 일정한 속도로 낙하한다. 이 때의 낙하속도를 종단속도(**terminal velocity**) 라고 하며, 빗방울의 반경에 따라 그림 4에 표시된 것처럼 변화한다.<sup>(5)</sup>

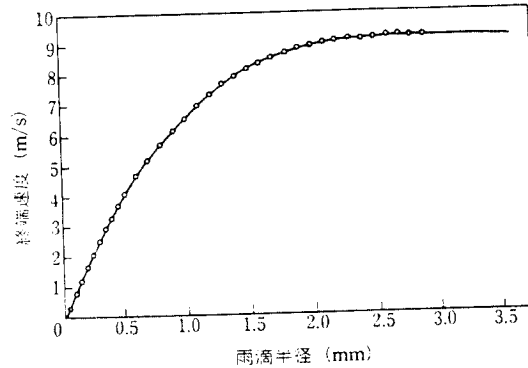


그림 4 대기 중을 낙하하는 빗방울의 종단속도와  
빗방울 크기의 관계

낙하하고 있는 빗방울의 대기중에서의 크기 분포를 정확히 측정한다는 것은 매우 어렵기 때문에 보통 지표부근에서 계측한다. 가장 일반적인 방법은 ‘로 용지법’으로 ‘로’라 불리는 용지에 푸른 색 등의 색소를 칠해 이 검사지를 단시간동안 빗방울에 노출시켰다가 빗방울에 의한 변색 또는 발색된 흔적의 크기를 측정하여 빗방울의 크기와 갯수의 분포를 측정하는 방법이다. 현재 일본에서는 빗방울의 운동량과 전하량 또는 단면적 등을 자동측정하는 방법이 개발되어 사용되고 있다.<sup>(6)</sup>

이 외에 분말 방식이 있는데 이것은 깨끗한 분말이 담긴 판을 짧은 시간 동안 빗속에 노출시켰다가 빗방울에 의해 생긴 분말 덩어리의 크기와 무게를 측정하여 빗방울의 크기분포를 얻는 방식이다.

빗방울의 크기분포는 강우율과 강우형태의 함수이다. 그러나 동일한 강우율이라도 비가 올 때마다 그 크기 분포의 변화가 심하기 때문에 각 강우율에 대한 분포를 평균하여 사용한다. 빗방울의 크기 분포  $n(a)da$  는 빗방울의 낙하속도  $v(a)[m/sec]$  와 지상의 빗방울 체적 분포  $m(a)da$  에 의해 다음과 같이 계산된다.<sup>(7)</sup>

$$n(a)da = \frac{10^3 \times R \times m(a)da}{4.8 \pi \times a^3 \times v(a)} \quad (14)$$

여기서  $R$ 은 강우율로서 식 (14)로부터 다음과 같이 표현된다.

$$R = 4.8 \pi \times 10^{-3} \times \int v(a) \cdot a^3 \cdot n(a) da \quad (15)$$

그림 5는 강우강도에 따른 빗방울의 크기와 분포의 상관계수  $N(a)$ 의 관계를 나타낸 것으로 Marshall과 Palmer에 의해 캐나다에서 측정된 결과이며, 점선은 Laws와 Parson에 의해 워싱턴에서 측정된 결과이다.<sup>(8)</sup> 이들의 결과에 의하면 빗방울 크기분포의 밀도계수  $N(a)$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$N(a) = N_0 \exp(-\lambda a) \quad (16)$$

$$N_0 = 1.6 \times 10^4 (\text{mm}^{-3} \cdot \text{mm}^{-1}) \quad (17)$$

$$\lambda = 8.2 R^{-0.21} (\text{mm}^{-1}) \quad (18)$$

여기서  $a$ 는 빗방울의 반경 (mm),  $R$ 은 강우강도(mm/h)이다. 표 2에 측정자마다 다른 빗방울의 크기분포 파라미터를 나타내었다.

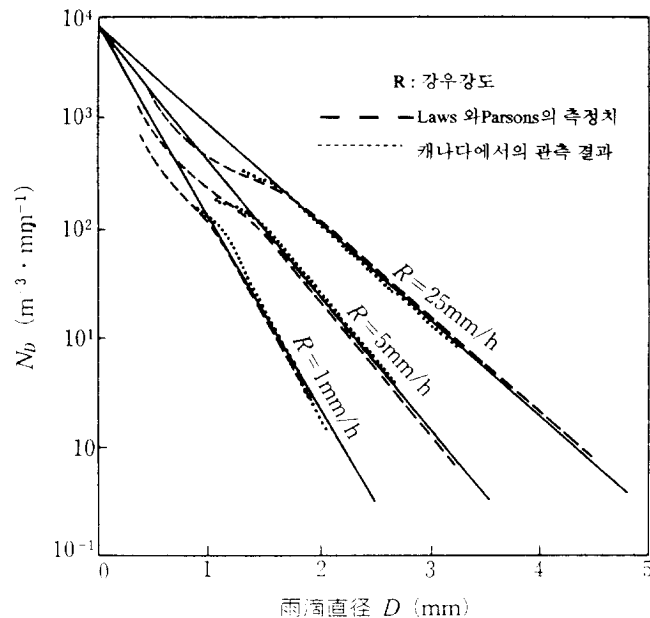


그림 5 강도에 따른 빗방울의 크기와 분포의 상관계수  $N(a)$ 의 관계



측 정 자		$N_0 (m^{-1} mm^{-3})$	$A (mm^{-1})$
Marshall & Palmer		16,000	$8.2 R^{-0.21}$
Joss 의	안개비	60,000	$11.4 R^{-0.21}$
	보통비	14,000	$8.2 R^{-0.21}$
	뇌 우	2,800	$6.0 R^{-0.21}$

표 2 빗방울 크기분포 파라미터

## 2. 빗방울 산란 이론<sup>(9)</sup>

그림 6과 같이 좌표의 중심에 놓인 빗방울에 평면전자파가 입사되면 우적에 의한 산란이 생긴다. 단위입사전계를 가정하면 먼거리에서의 산란파의 전계강도는 다음과 같다.

$$E^s = f(K_1, K_2) r^{-1} \exp(-ikr) \quad (19)$$

여기서  $K_1, K_2$  는 각각 입사파와 산란파의 진행방향의 단위벡터,  $f(K_1, K_2)$  는 산란파의 산란파의 산란진폭과 편파상태를 나타내는 계수,  $r$ 은 좌표중심에서 관측점까지의 거리이다.

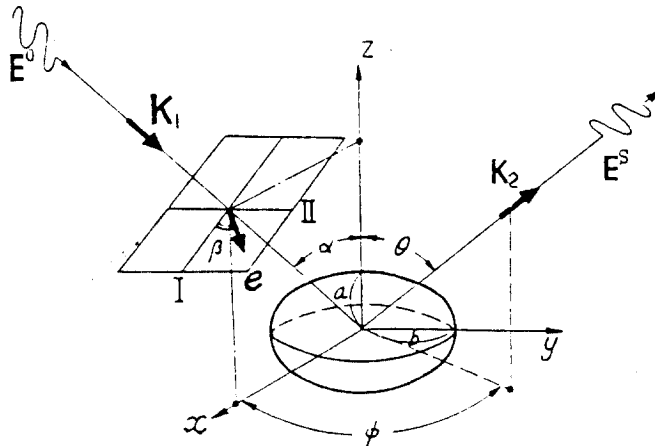


그림 6 빗방울 산란 좌표계

빗방울의 전단면적  $Q_t$  와 벡터산란진폭  $f(K_1, K_2)$  는 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$Q_t = \left(-\frac{4\pi}{R}\right) \text{Im}\{e \cdot f(K_1, K_2)\} \quad (20)$$

일반적으로 300 GHz 이하의 주파수의 강우에 의한 흡수, 산란을 생각할 때, 다중산란(multiple scattering)을 고려하지 않아도 큰 오차는 생기지 않는다. 따라서, 강우감쇠(rain attenuation)  $A(\text{dB/km})$ 는 전파경로상에 존재하는 개개의 빗방울에 의한 단일 산란특성의 합으로 계산될 수 있다.

$$A = 4.343 \times 10^3 \times \int Q_t(a) N(a) da \quad (21)$$

$$Q_t(a) = -\frac{\lambda}{2\pi} \text{Re} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) (a_n + b_n) \quad (22)$$

여기서  $Q_t(t)$ 는 직경이  $D$ 인 구형 빗방울의 전단면적,  $\lambda$ 는 파장,  $a_n, b_n$ 은 산란파의 구좌표의 고유벡터파동계수에 전개시켰을 때 전개계수이다.  $N(a)$ 는 빗방울 크기 분포의 밀도계수로서 식(5)와 같다.

그림 7은 각종 빗방울 크기분포에 대응되는 거리 km당의 강우감쇠, 즉 강우감쇠계수(specific rain attenuation)의 계산치이다.<sup>(10)</sup>

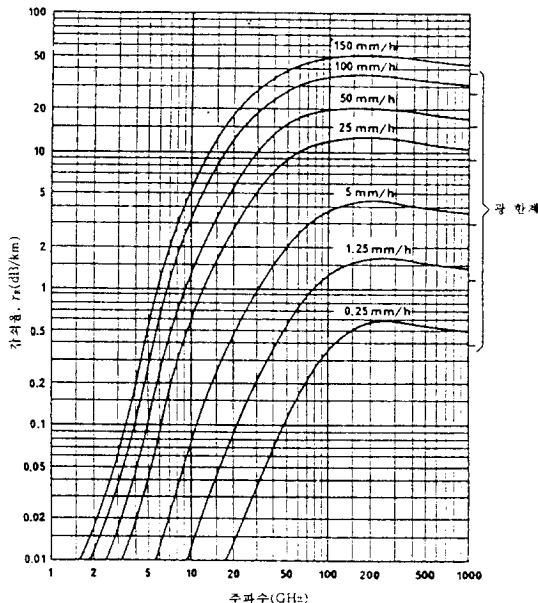


그림 7  
빗방울 크기분포에 대응  
되는 강우감쇠계수 계산치

그림에 나타나 있는 것처럼 모든 강우율에 대해 감쇠율은 약 100 GHz의 주파수대까지 아주 빠르게 증가한다. 100 GHz 이상에서는 아주 낮은 강우율을 제외하고는 감쇠율이 주파수에 무관하게 일정한 값을 유지하는 것으로 보인다. 200 GHz 이상에서 감쇠율은 강우율에 따라, 주파수의 증가에 따라 서서히 감소하는 추세를 보인다.

지상의 강우강도  $R(\text{mm/h})$ 는 그림 4의 지상근처의 강우낙하속도  $v(a)(\text{m/s})$ 를 이용하여 식 (15)와 같이 주어진다. 식 (15)와 식 (23)에서 알 수 있는 것처럼 강우감쇠와 지상강우강도는 빗방울 크기분포의 밀도계수  $N(a)$ 를 매개로 하여 유사한 계수관계를 갖으므로 강우강도  $R(\text{mm/h})$ 와 강우감쇠계수  $\gamma_R$ 는 다음과 같이 결합시킬 수 있다.<sup>(11)</sup>

$$\gamma_R = \alpha R^\beta \quad (23)$$

여기서  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 주파수, 빗방울 크기분포, 편파에 의존하는 파라미터로서 표 3에  $\alpha, \beta$  값의 계산예를 나타내었다.

주파수 (GHz)	$\alpha_R$	$zv$	$d_R$	$\beta_r$
1	0.0000387	0.0000352	0.912	0.880
2	0.000154	0.000138	0.963	0.923
4	0.000650	0.000591	1.121	1.075
6	0.00175	0.00155	1.308	1.265
7	0.00301	0.00265	1.332	1.312
8	0.00454	0.00395	1.327	1.310
10	0.0101	0.00887	1.276	1.264
12	0.0188	0.0168	1.217	1.200
15	0.0367	0.0335	1.154	1.128
20	0.0751	0.0691	1.099	1.065
25	0.124	0.113	1.061	1.030
30	0.187	0.167	1.021	1.000
35	0.263	0.233	0.979	0.963
40	0.350	0.310	0.939	0.929
45	0.442	0.393	0.903	0.897
50	0.536	0.479	0.873	0.868
60	0.707	0.642	0.826	0.824
70	0.851	0.784	0.793	0.793
80	0.975	0.906	0.769	0.769
90	1.06	0.999	0.753	0.754
100	1.12	1.06	0.743	0.744
120	1.18	1.13	0.731	0.732
150	1.31	1.27	0.710	0.711
200	1.45	1.42	0.689	0.690
300	1.75	1.35	0.676	0.689
400	1.92	1.37	0.683	0.684

표 3. 주파수와 편파에 따라 계산된  $\alpha, \beta$ 의 값

마이크로파대와ミリ파대 전파를 이용하는 통신계에 있어서 서로 교차하는 두개의 편파를 이용해 다른 신호를 전송할 수 있다면 주파수의 이용효율을 두배로 높일 수 있다. 그러나 강우시에는 빗방울이 구형에서 벗어난 편평회전타원체이기 때문에 강우시에는 두개의 교차편파간에 결합이 생겨 혼신이 발생한다. 편파의 교차정도는 수신신호의 주편파(co-polarized signal)와 교차편파(cross-polarized signal)를 비교하여 나타낸다. 즉 교차편파식별도(cross-polarization discrimination) XPD와 교차편파분리도(cross-polarization isolation) XPI가 사용되는데 수식으로는 다음과 같이 표현된다.<sup>(12)</sup>

$$XPD_H = 20 \log |E_{HH} / E_{HV}| \quad (24)$$

$$XPD_V = 20 \log |E_{VV} / E_{VH}| \quad (25)$$

$$XPI_H = 20 \log |E_{HH} / E_{VH}| \quad (26)$$

$$XPI_V = 20 \log |E_{VV} / E_{HV}| \quad (27)$$

여기서 첨자 H와 V는 각각 수평, 수직 편파를 나타내고,  $E_{HH}(E_{VV})$ 는 송수신 모두 수평(수직)편파, 즉 평행편파의 수신전계이고  $E_{HV}(E_{VH})$ 는 수평(수직)편파 송신, 수직(수평)편파 수신, 즉 교차편파의 수신전력이다.

편파의 감쇠특성을 나타내는 데는 수평편파와 수직편파의 감쇠차(differential attenuation, DA)  $\Delta A(\text{dB})$ 와 위상차(differential phase shift, DPS)  $\Delta \phi(^{\circ})$ 가 사용된다. 또 장기간의 측정에 있어서 주편파의 감쇠(co-polar path attenuation, CPA, dB)의 통계치와 교차편파식별도 XPD(dB)의 통계치의 사이에는 다음과 같은 관계가 있다.<sup>(4), (12)</sup>

$$XPD = U - V \log(\text{CPA}) \quad (28)$$

$$U = 30 \log f - 40 \log(\cos \epsilon) + 0.0053 \sigma^2 - 10 \log[0.5\{1 - \cos(4\tau) \exp(-0.0024 \sigma^2)\}] \quad (29)$$

$$V = 20 \quad (8 \leq f \leq 15 \text{ GHz}) \quad (30)$$

$$= 3 \quad (15 \leq f \leq 35 \text{ GHz}) \quad (31)$$

여기서  $f$ 는 주파수(GHz),  $\epsilon$ 은 전파로의 양각,  $\tau$ 는 입사 편파면의 수평면과 이루는 각도를 나타낸다.

### 3 강우의 구조와 통계적 성질

강우는 시간적, 공간적으로 변하기 때문에 강우강도를 평가하는데는 통계적인 방법이 사용된다. 시간적 변동은 강우의 누적시간분포를 이용하고, 공간적 변동은 강우강도의 공간상관계수 등을 이용해 표시한다. 전파경로상의 강우감쇠는 이들 값을 이용해 추정할 수 있다. 강우강도의 측정은 강한 강우의 경우, 단시간동안 강우강도가 크게 변화하기 때문에 응답속도가 빠른 우량계를 사용하는 것이 좋다. 보통 1분 강우강도 데이터를 사용하는데, 5분간 또는 10분간 또는 그 이상의 강우 데이터밖에 얻을 수 없는 경우에는 통계적 방법을 이용하여 1분 우량강도로 환산하여 사용한다.<sup>(13)</sup>

강우의 구조는 공간적으로 일정하지 않고, 유형, 지형 등에 따라 강우영역의 크기, 강도 등이 변화한다. 강우영역의 크기  $d(\text{km})$ , 즉 강우의 공간적 변동의 정도는 강우강도의 공간상관계수  $\rho(d)$ 로 평가될 수 있다. 일본에서 실제로 측정된 데이터에 의해 얻어진 결과에 의하면,  $\rho(d)$ 는 다음과 같다.

$$\rho(d) = \exp(-a\sqrt{d}) \quad (32)$$

$a$ 는 지상회선의 경우 약  $0.3 (\text{km}^{-1/2})$  정도이다. 유럽에서의  $\rho(d)$ 는

$$\rho(d) = \exp(-\beta d) \quad (33)$$

이고  $\beta = 0.3 - 1.0 (\text{km}^{-1})$ 이다.

강우산란의 경우에는 수신 안테나 빔의 공통체적 중에 있는 강우 셀(rain cell)의 크기가 중요해 진다. 강우셀의 크기는 레이다 반사계수의 빔 값을 포함하여, 가장 높은 값의 절반이 되는 값을 갖는(-3dB) 곡선에 의해 경계지워지는 영역으로 정의된다. 비가 내리는 영역내에서 강우셀은 대개 덩어리 상태로 되어 있으므로 10km 이상의 전파로에 대해서는 하나 이상의 강우셀을 통과하게 된다는 사실을 고려해야 한다.

강우의 수직구조를 관측하기 위해서는 레이다를 많이 이용하는데 강우의 수직구조에는 다음과 같은 두개의 명확한 유형이 있다.<sup>(8)</sup>

(1) **Bright Band** 로 불리는, 레이다 반사계수가 큰 얇은 층을 동반하는 층상성

강우(Stratiform rain)

(2) 레이더 반사 계수가 큰, 수직에 가까운 기둥모양의 영역을 갖는 대류성 강우(Convective rain)

## 제4장 강우이외의 대기입자에 의한 감쇠특성<sup>(10),(14)</sup>

물기가 없는 눈과 진눈깨비는 30GHz 이하의 주파수의 전파에는 거의 영향이 없으나, 30GHz에서 환산강수강도가 10 mm/h인 눈의 경우 1 km당의 강설감쇠는 약 3 dB이다. 그러나 주파수가 높아지면 물기가 없는 눈에 의한 감쇠가 커진다는 것이 최근의 실험에 의해 밝혀지고 있다. 눈, 비가 섞인 경우의 감쇠보다도 동일환산강수강도의 강설에 의한 감쇠가 더 크다는 실험 결과가 발표되었지만 일반적으로 환산강수강도가 크지않기 때문에 문제가 되지 않는다. 또 전파전파 경로상의 강설보다도 눈과 얼음의 부착에 의한 안테나 특성의 열화에 의한 영향이 더 중요한 문제가 된다.

구름과 안개에 의한 마이크로파의 산란과 흡수에 의한 감쇠량의 계산에서는 레일리 근사를 이용할 수 있는데 이때, 구름의 감쇠계수  $\gamma_c$ (dB/km)는 다음과 같이 주어진다.

$$\gamma_c = K_1 M \quad (34)$$

여기서  $M$ 은 구름의 수분량( $g/m^3$ ),  $K_1$ 은 단위수분량당의 감쇠계수  $(dB/km)/(g/m^3)$ 이다.

그림 8은 주파수의 함수로서 계산된 다양한 온도에서의 수운(water cloud)에 의한 감쇠를 나타낸다. 100 GHz 이상의 주파수가 되면 안개의 영향도 무시될 수 가 없는데, 시정(visibility, 대기의 혼탁정도를 거리로 나타낸 것으로 지평선의 하늘을 배경으로 적당한 크기의 검은 목표물을 식별할 수 있는 거리) 약 300 m 정도의 안개의 수분량은 약  $0.05g/m^3$ , 시정 약 50 m의 짙은 안개의 수분량은 약  $0.5 g/m^3$ 이며, 이에 대응되는 감쇠계수는 각각 140 GHz에서 약 0.4 dB/km, 4 dB/km이다.

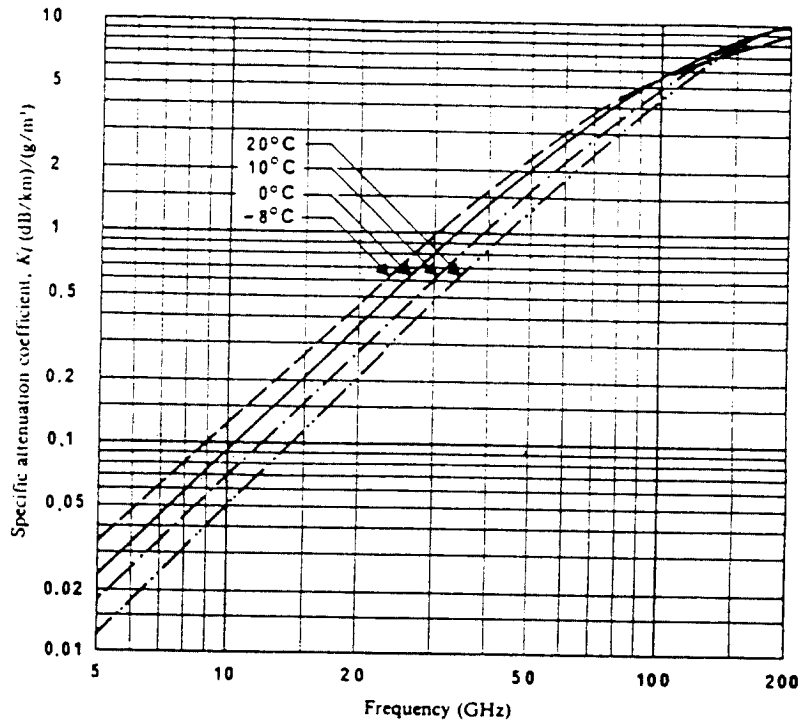


그림 8. 주파수의 함수로서 계산된 다양한 온도에서의 수운에 의한 감쇠

모래먼지에 의한 감쇠는 강우에 의한 감쇠와 같은 메카니즘에 의해 발생한다. 모래먼지의 감쇠특성은 cm 파대에서는 레일리 산란이론을 이용하고, 보다 짧은 파장대에서는 미(Mie) 이론을 이용하여 평가할 수 있다. cm 파대에서 모래먼지의 감쇠계수는 주파수에 비례하고, 시정의 역수에 비례한다.

## 제5장 강우에 의한 전파전파 감쇠특성 연구

### 1. 주파수대역별 전파전파 시스템

전파연구소에서는 강우에 의한 전파전파 감쇠특성을 주파수 대역별로 실험하기 위한 계획을 세우고 1991년 9월에 기상관측 시스템을 도입하여 전계강도 측정과는 별도로 기상관측을 수행하고 있으며, 1992년 8월부터는 일본의 방송위성 BS 의 전계강도를 계속 측정하고 있다. BS 전계강도 측정 시스템에는 강우량 측정을 위한 Tipping Bucket이 연결되어 BS 전계강도 값과 강우시 우량값도 함께 기록된다. 기상관측 시스템과 BS 전계강도 시스템의 block diagram을 그림 9와 10에 나타내었다.

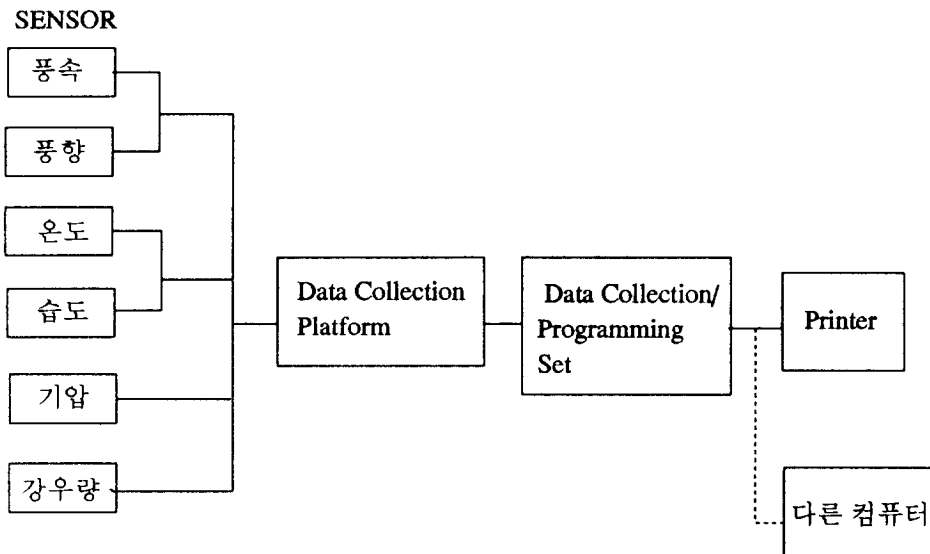


그림 9. 기상관측 시스템 Block Diagram

그림 10의 전계강도 측정 시스템의 운용상황에 대해서는 뒤에 설명하기로 한다.

이외에 V/UHF 대 전파전파 측정 시스템(20MHz-1GHz)과 Millimeter 파 전파 특성 측정 시스템(21.5GHz, 43GHz)이 구비되어 '94년부터 시스템의 구축과 실제 측정실험



을 수행할 예정이다. V/UHF 대 전파전파 측정 시스템은 이동가능하므로, 건물내 및 도심내 이동통신시의 전파전파특성을 파악하는 실험 연구를 수행하는데 이용될 것이며, Millimeter 파 측정 시스템은 강우 또는 대기중의 수분 함유량에 민감한 영향을 받는 밀리미터파 대역의 강우감쇠특성을 조사 연구하는데 이용될 것이다.

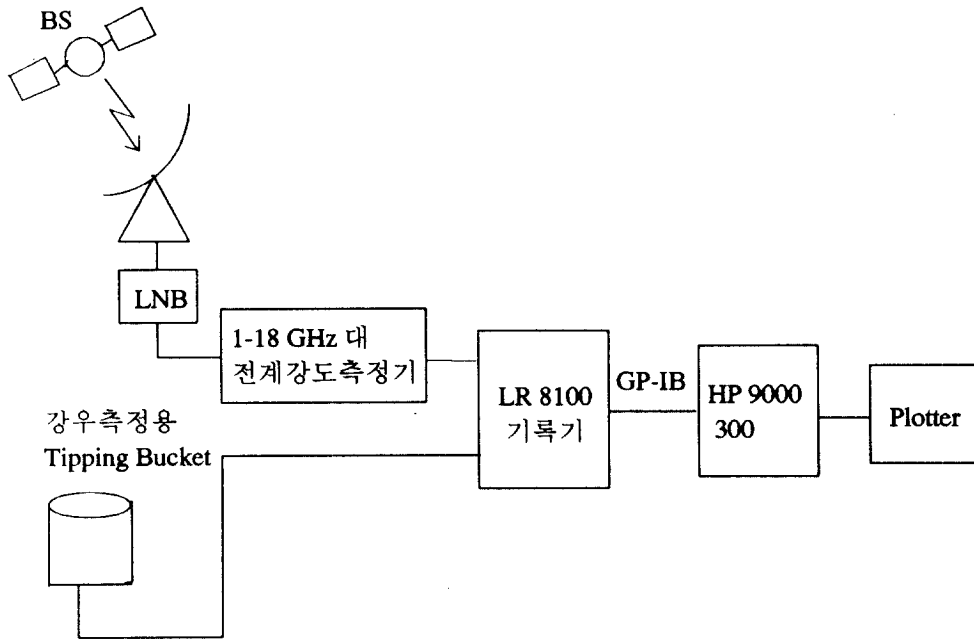
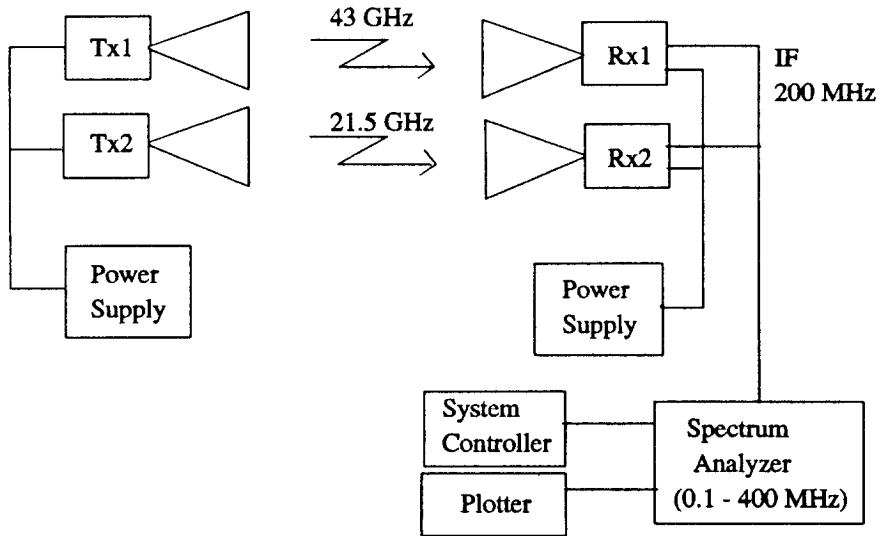


그림 10. BS 전계강도 측정 시스템 Block Diagram

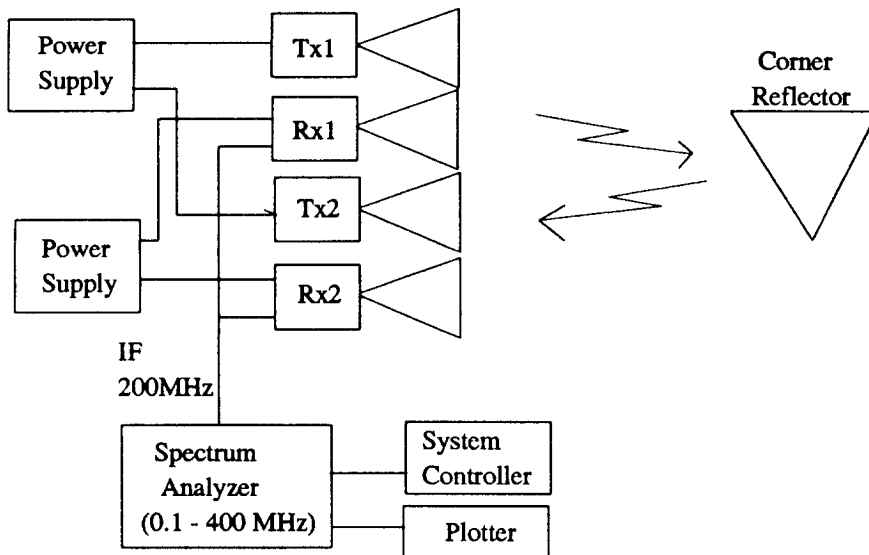
그림 11은 밀리미터파 전파특성 실험 시스템 구성 예상도이다. 시스템의 구성에는 두 가지 방법이 있는데 그림 11의 (a)는 송신위치와 수신위치를 달리하여 측정하는 방법이고, (b)는 Corner Reflector를 이용하는 방법으로 송신전파를 Corner Reflector에 반사시켜 송신기와 근접해 있는 수신 안테나로 보내는 방법이다.

## 2. 일본의 방송위성 BS 의 전계강도 측정

BS(Broadcasting Satellite)는 일본의 방송위성으로서 1990년 8월에 발사된 고정



(a) 송신위치와 수신위치를 달린 시스템 구상도



(b) 송신위치와 수신위치를 같게한 시스템 구상도

그림 11.ミリ미터파 전파특성 실험 시스템 구성 예상도

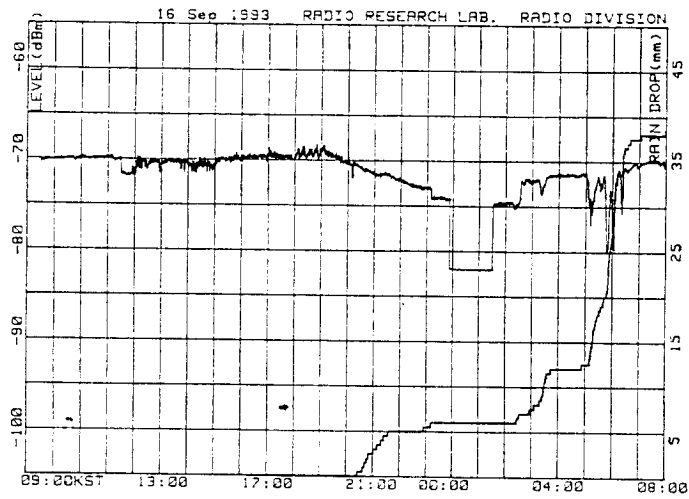
위성으로 동경 110 °의 정지궤도상에 위치해 있으며, 사용주파수는 11.7~12 GHz로써 마이크로파대 전파전파특성을 조사하기 위한 고정된 전파원으로 이용할 수 있다. 전파 연구소에서는 1992년 8월부터 이 위성에서 송신되는 전파의 전계강도 측정과 기상관측을 동시에 실시하여 기상조건에 따른 12 GHz 대의 전파전파특성 데이터를 수집하고 있다.

측정 시스템의 구성은 그림 10과 같다. 1.8 m  $\phi$  파라볼라 안테나로 수신된 12 GHz 의 전파는 LNB를 통해 2 GHz 대로 낮추어져 전계강도측정기로 유입, 측정된다. 이렇게 측정된 데이터는 기록기에 연속적으로 기록되며 다시 HP9000 컴퓨터에 매분마다의 값이 기록된다. 강우측정용 Tipping Bucket은 0.5 mm 의 비가 내릴 때마다 기록이 되도록 setting 되어 있다. 즉, 맑은 날에는 매분마다 전계강도를 측정하여 기록하고, 강수시에는 Tipping Bucket이 한번 움직일 때마다 강우량이 0.5mm씩 증가하는 것을 기록하고 그때의 전계강도도 함께 기록한다.

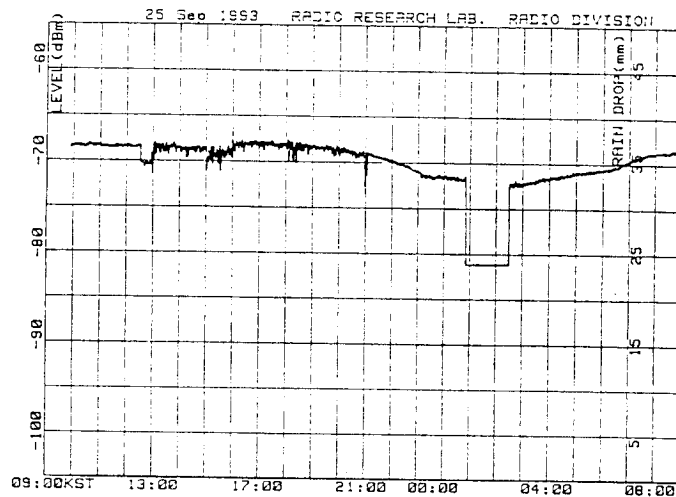
그림 12의 (a)는 최고 25 mm/h의 강우율로 폭우가 쏟아진 1993년 9월 16일의 BS 전계강도 측정기록이고, (b)는 비슷한 시기의 맑은 날인 9월 25일의 전계강도 기록이다. (a)와 (b)를 비교해 보면 강우율이 높은 시간대에 전계강도 감쇠가 심하게 일어나는 것을 볼 수 있다. 이러한 데이터들을 많이 축적하여 그들로부터 감쇠와 강우율간의 상관관계를 얻어내는 것이 앞으로 수행해야 할 과제의 하나이다.

강우율과 주파수 대역별 강우감쇠의 관계를 규명하기 위해서는 시스템의 안정성을 바탕으로 하는 다년간의 축적된 데이터가 필요하다. 시스템의 안정성과 신뢰성의 측면에서 볼 때, 현재 운용되고 있는 BS 전계강도 및 강우량 측정 시스템에는 몇가지 문제점이 있다. 첫째는 강우데이터의 신뢰성이 낮다는 것이다. 이것은 강우량 측정기기의 노화로 인해 가끔 원하지 않는 데이터가 기록되곤 한다. 즉, 비가 오지 않았는데도 한 순간에 50 mm 이상의 비가 온것으로 기록되는 경우가 있다. 이러한 데이터는 통계처리를 위해서 일일이 수작업으로 제거해 주거나 통계처리하는 데이터에서 아예 빼버려야 한다. 이 문제점을 해결하기 위해서 현재의 강우 측정기기를 기상관측 시스템의 강우측정 센서로 대체하는 방안을 모색하고 있다.

둘째는 현재 분당 또는 강우시 수시로 기록되는 데이터의 저장과 재현에 따른 문제이다. 현재 데이터를 수집하고 저장하는 프로그램의 언어가 HP-Basic 이기 때문에 일반적인 PC 상에서 데이터를 통계처리하기 위해서는 변환 과정을 한번 더 거쳐야 한다. 이러한 번거로움을 해결하고 시스템 운용의 효율을 높이는 방안을 모색하고 있다.



(a) 폭우시 BS 전계강도의 변화(1993년 9월 16일)



(b) 맑은 날의 BS 전계강도(1993년 9월 25일)

그림 12. 맑은 날과 강우시의 전계강도 변화 비교

세제는 강우관측 환경의 문제이다. 강우관측은 관측기 주변에 빗방울의 낙하방향을 바뀌게 할 만한 장애물이 없어야 한다. 그러나 현재의 강우 측정기 주변에는 5 m  $\phi$  위성 안테나를 비롯하여 여러 용도의 안테나들이 설치되어 있어서 이들에 부딪쳐 측정기안에 유입되는 빗방울들이 있어서 실제 강우량 또는 강우율의 정확도를 떨어뜨린다. 이것은 강우 측정기의 이설 또는 통계처리시의 충분한 오차율을 고려함으로써 오차를 최소화하는 방법이 필요할 것으로 생각된다.

## 제6장 결 론

지금까지 대기중을 진행해 나가는 전파에 영향을 미치는 요인들과 강우의 특성 및 감쇠특성에 대한 이론 및 실험보고들에 대해 알아보았고, 실제 전파전파 특성을 실험하기 위한 시스템의 현황과 계획, 그리고 현재 수행하고 있는 측정업무에 대해 기술하였다.

대기가스를 구성하고 있는 성분들 중에서 가장 큰 영향을 미치는 것은 산소분자와 수증기이다. 산소분자는 50 - 70 GHz 에 근접된 다수의 흡수선에 의한 흡수대와 18.75 GHz 의 흡수선을 갖으므로 이 주파수대의 전파전파에 감쇠를 초래한다. 수증기는 22.2 GHz, 183.3 GHz, 325 GHz대에 흡수선을 갖는다. 따라서 22 GHz 대와 120 GHz - 10 THz 대 전파전파 감쇠는 대기중의 수증기량의 변화에 따라 변화한다. 또한 전파 감쇠는 경로길이에 따라 달라진다. 즉, 전파경로가 지상근처인지, 대기층을 수직에 가깝게 관통하는지 등에 따라 감쇠특성이 달라진다.

5 GHz 이상의 전파는 강우시 매우 큰 감쇠를 일으키는데 이것은 빗방울에 의한 산란과 흡수에 기인한다. 감쇠정도는 빗방울의 모양과 크기분포, 그리고 강우율에 의존한다. 빗방울의 모양은 크기가 커짐에 따라 타원형으로 되고, 직경 4 mm 이상이 되면 밑면에 홈이 파진 형태가 된다. 빗방울의 크기분포는 빗방울의 낙하속도와 강우율의 함수이다. 이러한 값들은 지역이나 계절, 기상상태 등에 따라 달라지는데, 우리나라에 있어서의 통계적 연구결과는 국제적으로 보고되어 있지 않으므로 우리나라내의 강우분포와 그에 관련된 연구들이 반드시 수행되어야 한다.

빗방울이 완전구형체가 아니기 때문에 전파가 빗방울에 부딪쳐 산란됨에 따라

진행방향이 바뀌면서 교차편파간의 간섭을 유발시킨다. 편파의 감쇠특성은 주편파의 감쇠와 교차편파식별도의 통계적인 처리에 의해 얻어진다.

강우이외의 대기입자, 즉, 눈, 진눈깨비 등도 전파의 감쇠에 영향을 미치지만 환산강수강도가 비에 비해 크지않기 때문에 큰 문제가 되지는 않는다. 그러나 눈 등이 안테나에 부착됨으로써 생기는 안테나 특성의 열화 등이 고려되어야 한다.

구체적인 실험계획과 수행상황에 대해서도 기술하였다. 현재 12 GHz 대 전파의 강우감쇠 특성연구를 위해 BS 전계강도측정과 기상관측 데이터를 계속 수집하고 있으며, 앞으로 V/UHF 대와 Millimeter 파대 전파특성 연구를 수행할 예정이다. 금년에는 측정된 데이터에 대한 분석이 이루어지지 않았으나 94년도에는 지금까지 수집된 12 GHz 대 전계강도 측정 데이터와 기상관측 데이터의 개별적인 통계처리와 둘간의 상관관계를 분석해 내고자 한다. 또한 이 데이터 분석의 경험을 축적하여 V/UHF 대와 Millimeter 파대 측정 데이터의 분석에도 응용할 수 있도록 하고자 한다.

이상과 같은 전파전파의 강우감쇠특성 연구는 현재는 기상조건, 특히 강우와의 관련성 조사에 한정되어 있지만 앞으로는 기상조건뿐만 아니라 지형 지물에 의한 굴절과 산란, 이동체 통신의 특성 연구 등으로 확대되어 실제 통신의 최적환경을 마련하고 전파자원의 효율적 관리의 토대가 되는 연구를 계속 수행할 필요가 있다.

## 참 고 문 헌

- (1) CCIR Report 693-3 "Technical and Operational Considerations for Earth Exploration Satellite Service", Recommendations and Reports of the CCIR, vol.II, 378-401, ITU, Geneva, 1990
- (2) CCIR Report 719-3 " Attenuation by Atmospheric Gases", Recommendations and Reports of the CCIR, vol. V. 187-202, ITU, Geneva, 1990
- (3) Liebe, H.J., "An Updated Model for Millimeter Wave Propagation in Moist Air", Radio Science, 20, no.5, 1069-1089, 1985
- (4) Oguchi, T., "Electromagnetic Wave Propagation and Scattering in Rain and Other Hydrometeor", Proc. IEEE, 71,no.9, 1029-1078, 1983
- (5) Medhurst, R.G. " Rainfall Attenuation of Centimeter Waves : Comparison of Theory and Measurements", IEEE Trans. Ant. Prop., Ap-13, 7, 550-564, 1965
- (6) 藤間克典 外, "ミリ波帯 電波傳播實驗計劃" 電波研究所季報, 26,no.138, 1986
- (7) 홍 완표 " 강우에 의한 위성통신신호의 감쇠특성 연구", 연세대학교 산업대학원 석사학위 논문, 1993
- (8) 進士昌明 "無線通信の電波傳播", 電子情報通信學會, 1992
- (9) Oguchi, T. " Scatteing and Absorption of a Millimeter Wave due to Rain and Melting Hailstones", J. Radio Research Laboratory, 13 141-172, 1966
- (10) CCIR Report 721-3 " Attenuation by Hydrometeors in Particular Precipitation and Other Atmospheric Particles", Recommendations and Reports of the CCIR, vol. V, 224-238, ITU, Geneva, 1990
- (11) Olsen, R.L., Logers, D.V. and Hodge, D.B., "The aR Relation in the Calculation of Rain Attenuation", IEEE Trans. Ant. Prop. vol. Ap-26, 318-329, 1978
- (12) CCIR Report 722-3 " Cross-Polarization Due to the Atmosphere", Recommendations and Reports of the CCIR, vol. V, 249-259, ITU, Geneva, 1990
- (13) Hosoya, Y. " 日本各地の 1分 雨量分布の一推定法", 電子情報通信學會論文誌, vol. J71-B, 256-262, 1988
- (14) CCIR Report 563-4 " Radiometeological Data", Recommendations and Reports of the CCIR, vol. V, 10-3-146, ITU, Geneva, 1990