

## 전자파 Propagation 개요

金正祺  
中央大學校 電子工學科

### I. 서론

전자파는 발생점으로부터 수신점까지 지구표면을 따라서, 혹은 대기를 통하여 전리층이나 대류권으로부터의 반사 혹은 산란에 의해 또는 반사물체의 반사에 의해 전파된다. 일정한 라디오 시스템 응용이 설계되는 주위의 특별한 전파 메커니즘은 제공되는 정보나 서비스의 종류와 도달 거리, 그리고 필요한 신빙성을 포함하여 경제적인 인자등에 의존한다.

여러 가지 메커니즘은 주파수와 거리에 의존하며 다른 시스템과의 상호간섭이나 시스템의 실행에 영향을 미친다. 지구의 도전율이나 유전율은 대기의 것들과는 상당히 다르다. 가시거리 지역내에서는 자유공간의 전파와 거의 동일하나 대기의 회절때문에 꺾임, 반사, 산란, 페이딩이 일어난다. 아주 높은 주파수에서는 비, 공기, 수증기의 흡수에 의한 감쇄가 일어난다. 지상의 표면을 따라 주로 회절된 파는 주파수가 증가함에 따라 손실도 증가하게 된다. 매우 낮은 주파수의 파는 수천 km에 걸쳐 거의 감쇄없이 전파된다. 고주파에서는 지상을 따라 일어나는 손실이 너무나 커서 짧은 거리에서만 사용할 수 있도록 제한된다. 높은 주파수에서는 전리층의 반사로 무선 통신이 매우 먼거리를 갈 수가 있다.

30MHz 이상의 주파수에서는 이온층의 반사가 거의 없으므로 가시거리 전파통신을 주로 사용하나 가시거리가 넘는 지역은 이온층 산란 전파를 이용한다.

### II. 동질매질에서의 전파

전자파복사는 두개의 상호 의존적인 벡터필드, 즉

전기장과 자기장으로 구성되어있다. 전기장은 벡터 E, 즉 전기장의 세기 (v/m)와 D, 즉 유전체변위 (c/m<sup>2</sup>)에 의해 특징 지워진다. 그리고 자기장은 H, 즉 자기장의세기 (A/m)와 B, 즉 자속밀도 (weber/m<sup>2</sup>)로 특징 지워진다. 벡터 전류밀도 J의 단위는 A/m<sup>2</sup>이다.

여러 가지 필드벡터 사이의 관계는 매질의 전기적인 상수에 의해 특징 지워진다.

$$\epsilon = \text{유전체 상수 } F/m$$

$$\sigma = \text{도전율 } \Omega/m$$

$$\mu = \text{투자율 } H/m$$

실제 전기장은  $E \exp j\omega t$ 의 실수부분이다. 여기서 E 필드를 구하기 위해서 우선, 다음과 같은 방정식으로 부터 시작한다.

$$(\nabla^2 - \gamma^2)E = 0$$

여기서  $\nabla^2$ 은 Laplacian 연산자이고  $\gamma^2 = j\mu\omega(\sigma + j\omega\epsilon)$ 이며,  $\gamma$ 는 전파 상수이다. 매질의 전기적인 상수의 역할을 간단하게 증명하기위해서 파의 필드가 단지 z 방향으로 변한다고 가정하고, 전기장은 단지 x 방향의 성분만 갖는 다고 가정하면, 이러한 경우에 위 방정식은 다음과 같이된다.

$$\left(\frac{d^2}{dz^2} - \gamma^2\right)E_x = 0$$

여기서 E에 관해 풀면

$$E_x = A \exp(\gamma z) + B \exp(-\gamma z) \text{ 이 되고}$$

$$H_y = -\frac{1}{j\mu\omega} \frac{\partial E_x}{\partial z}$$

$$= -\eta^{-1}[A \exp(+\gamma z) - B \exp(-\gamma z)] \text{ 이 된다.}$$

$$\eta = \left( \frac{j\omega\mu}{\sigma + j\epsilon\omega} \right)^{1/2}$$

여기서  $\eta$ 는 평면파 전파에 대한 매질의 특성임피던스이며,  $A \exp(\gamma z)$ 는 양의 z방향으로 진행하는 파이고,  $B \exp(-\gamma z)$ 는 음의 z방향으로 진행하는 파이다. 전기장과 자기장은 진행방향에 대해서 둘다 수직이며 서로 직교한다.

이러한 전파의 속도는

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}}$$

로 정의되며 이것을 파의 위상속도라고 부른다. 이것은 단순히 위상의 전파속도를 나타내며, 파 혹은 신호가 전파되는 속도와 반드시 일치하지는 않는다.

파장은 한 주기안에서 파가 전파되는 거리로써 정의된다.

$$\lambda = \frac{2\pi}{\omega\sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{v}{f}$$

자유공간상에서의 파의 속도는

$$v_0 = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} = 3 \times 10^8 \text{ m}$$

가 된다.

자유공간의 특성 임피던스는

$$\eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \approx 120 \Omega$$

이 된다.

전자장의 에너지 흐름은 포인팅 벡터로 나타내며 다음과 같이 정의된다.

$$P = E \times H$$

포인팅 벡터의 실수부분은 전송방향의 단위면적당 시간변화의 한주기의 시간변화에 대한 평균 전력의 흐름을 나타낸다.

$$P_{av} = 1/2 \text{Re}(E \times H^*) = \frac{E^2}{2\eta_0} \text{ W/m}^2$$

이 되며, 이것은 전력속 밀도라 부른다.

### 1. 파의 편향

#### 1) 타원형 편파

전기장 벡터 E가 파의 한주기에 걸쳐 전파방향에 대해 수직인 평면에 대해 타원으로 나타날 때 이러한 파는 타원형 편파이다.

#### 2) 원형 편파

직교성분의 진폭이 같고 그 위상이  $n \frac{\pi}{2}$  (n은 홀수)배 차이가 날 때, 이러한 파는 원형 편파이다.

### 2. 반사

파의 전파에서 대부분의 문제는 서로 다른 굴절성질을 가지고 있는 매질 사이에서, 특히 공기와 지면사이, 혹은 공기와 전리층 사이의 경계로부터의 반사를 포함하고 있다. 그림 1은 무한한 평면표면에서 평면파의 굴절에 대한 Snell의 법칙을 증명하고 있다.

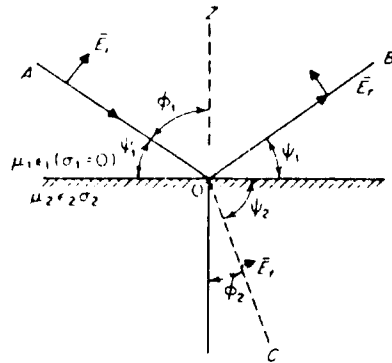


그림 1. 반사와 투과 모형

전파방향과 경계에 수직한 각  $\phi$ 를 입사각이라고 하고, 전파방향과 경계사이의 각  $\psi$ 를 grazing angle이라고 한다. 경계에서는 E와 H의 접선성분이 연속이어야한다. 이러한 조건을 만족하기 위해서 반사된 파의 위상은 입사파의 위상과 일치한다. C를 향해 투과된 파에 대한 Snell의 굴절법칙은 다음과 같다.

$$n_1 \cos \psi_1 = n_2 \psi_2$$

투과된 파  $E_t$ 가 그 입사값의 1/e로 감소하는 투과 깊이  $\delta$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\omega\mu\sigma/2}} \text{ 가 된다.}$$

3. 회절과 산란

1) 회절

지구의 구형태와 지형의 불규칙성은 회절현상을 일으킨다. 이것은 Huygen의 원리에 따른 공간상에서 빛의 재분포에 대한 메카니즘이며, 그곳에서는 소스로부터 직접 오는 빛이 지구의 수평선과 같은 어떤 물체의 가장자리에서 가로채어 어두운 지역으로 기본적인 작은 파들로 재 복사된다.

2) 산란

산란은 지구의 거친 표면과 대기 혹은 전리층의 굴절지표가 작은 불규칙성을 가짐으로써 발생한다. 이것은 대기중에서의 빛의 산란과 유사하다.

4. 전송 손실

송신 안테나, 수신 안테나, 그리고 전파매질들 구성하고 있는 무선 회로의 전송 손실은  $p_t/p_a$  의 비로 정의될 수 있으며, 여기서  $p_t$ 는 송신 안테나에서 복사되는 무선 주파수의 전력이며,  $p_a$ 는 결과로서 생기는 무선 주파수의 전력이다. 전송 손실은 일반적으로 decibel로 표현된다.

$$L = 10 \log(p_t/p_a) = L_s - L_{tc} - L_{rc} \quad \text{dB}$$

여기서  $L_s$ 는 시스템 손실이고,  $L_{tc}$ 와  $L_{rc}$ 는 송신 안테나와 수신안테나 회로에서의 손실을 의미한다. 자유공간에서의 기본적인 전송손실은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$L_{bf} = 10 \log(4\pi d/\lambda)^2 \quad d \gg \lambda$$

$$= 32.45 + 20 \log f + 20 \log d$$

$L_{bf}$  자유공간에서의 기본적인 전송손실이고,  $f$ 는 MHz단위의 주파수이고,  $d$ 는 km단위의 안테나사이의 직선 거리이다.

5. 자유공간에서의 감쇄

자유공간과 관련된 감쇄  $A$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$A = L_{bf} - G_t - G_r \quad \text{dB}$$

여기서  $G_t$ 와  $G_r$ 은 자유공간상의 송수신 안테나의 등방성 안테나에 대한 상대적인 이득을 말한다.

6. 필드의 세기와 전력흐름 밀도

필드의 세기는 수신위치에서 측정되고 관습적으로

전송에 대한 계산이나 예측을 하는데 사용된다. 수신 안테나 환경과 관련된 접지면손실이 무시될 때, 필드의 세기는 전송 손실과 관련지을 수 있다.

전력흐름 밀도는 다음과 같이 주어진다

$$p = \frac{e^2}{\eta} \quad W/m^2$$

여기서  $\eta$ 는 매질의 특성 임피던스이다.

Ⅲ. 비전리 대기를 통한 지구상의 전파

약 30 MHz이하의 주파수에서 지구전체에 걸친 전파, 그리고 비전리층을 통한 전파에서 중요한 메카니즘은 자유공간의 복사, 접지면 반사, 그리고 지구표면에서의 회절을 포함하고있다. 약 30MHz이상에서 중요한 메카니즘은 자유공간 복사, 높은 대기층으로 부터의 굴절, 반사, 그리고 접지면과 여러 가지 장애물에 의한 반사, 나무나 건물에 의한 에너지 흡수, 지구 표면에 걸친 회절, 구름에 의한 회절, 대기의 불규칙성에 의한 산란, 대기의 구성물에 의한 산란과 흡수등을 포함하고 있다. 지형과 기상학적인 조건은 대류권을 통한 전파의 세기와 감쇄성질을 결정하는데 중요한 역할을 한다. 수증기, 수분 입자, 그리고 산소에 의한 산란과 흡수효과는 10 GHz에서 지배적이다.

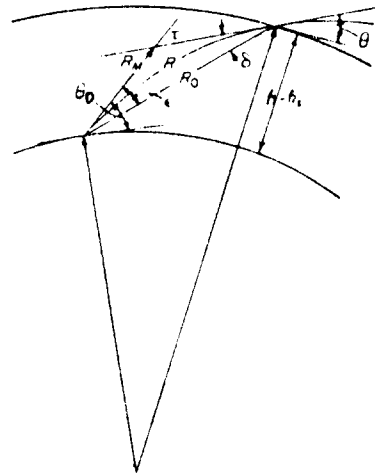


그림 2. 전파의 굴절 모형

### 1. 대류권의 굴절

무선파가 자유공간에서 전파된다면 직선으로 전파된다. 그러나 지구의 대기를 통과할 때 궤도를 따라 대기의 굴절지표의 수직한 경사도로 인해 전파의 경로가 곡선이 된다. 이것은 그림 2에 나타나있다.

종합적인 각의 굴절은  $\tau$ 이다. 대기의 무선 굴절지표  $n$ 은 항상 1.0003으로써 지구표면근처에서의 값 1보다 약간 큰 값을 가지며, 높이가 증가함에 따라 1(자유공간의 값)에 가까워진다.

대기의 무선 굴절 지표는 다음과 같다.

$$n = 1 + N \times 10^6$$

굴절율은 다음과 같다.

$$N = \frac{77.6}{T} \left( P + 4.810 \frac{e}{T} \right)$$

혹은

$$N = \frac{77.6}{T} \left( P + \frac{4.810e RH}{T} \right)$$

으로 나타낼 수 있다.

여기서  $P$ 는 대기압이고,  $e_s$ 는 온도  $T$ 에서의 포화 증기압이다. 또한  $T$ 는 절대온도이고  $RH$ 는 상대습도를 나타낸다.

### 2. 페이딩과 발산

대부분의 초고주파 링크에서는 일반적인 기상조건 하에서 심한 페이딩을 보이지 않는다. 그러나 대기의 성층권과 다른 기상조건에서는 심각한 페이딩을 일으킬 수 있다. 파워 페이딩은 지형 정리에 영향을 미치는 빔 굴곡, 도착 각, 빔의 편향 또는 트래핑과 강우에 의한 감쇄 등의 결과를 포함한다. 굴절 페이딩이라 불리기도 하는, 지형 정리 손실에 의한 파워 페이딩은 20 - 30dB의 깊이를 가진다.

페이딩은 또한  $\pm 3/4$ 의 수직과 0.1'의 수평까지의 도착 각 변화에 기인한다. 도관과 층으로 인해 파워 페이딩이 몇 시간 또는 며칠 계속될지도 모르지만, 20dB 또는 그 이상을 기록한다. 예상 감쇄는 10GHz이하일 때 중요할 수 있지만 10GHz이상에서는 원칙적으로 중요한 것이다. 다중로 페이딩은 지표 반사경로와 대기경로로부터 위상 간섭 효과를 포함한다. 굴절지수가 변화할 수록 간섭이 기상층 또는 상

승층으로부터의 직접파와 부분 반사사이와 마찬가지로 지면 또는 수면으로부터의 직접파와 그의 반사 사이에서 발생할 수 있다. 부가적인 직접 경로는 또한 기상전면과 접하고 있는 굴절 지수에서 강한 양의 굴절 기울기 또는 수평 분배 변화의 표면 층에 기인하여 전파될 수 있다. 주파수 선택 페이드는 컴포넌트 파의 상대적 크기에 의존하는, 자유 공간하에서 20 - 30dB까지 확장한다. 거울표면 반사는 몇 분간 지속되는 페이드를 만들 수 있다.

### 3. 10GHz상에서 기상 효과. Millimeter 파와 지표와 공간 전파

3GHz정도 이상의 주파수에서 대기 가스와 수면에 의한 무선파의 감쇄와 굴절 섭광과 다중로 효과는 점점 더 중요해지고 있다. 이러한 요소들은 10GHz이상의 주파수에서 radio-relay 또는 지구 위성 시스템에서 더욱 더 중요해지고 있다. 중요한 전파 효과는 분자 공명으로 인한 투명한 대기로 인한 흡수이다. 즉 비나 안개로 인한 감쇄와 분산, 기상 변동, 성층권, 지형 효과에 의해 위상 간섭이나 굴절 섭광을 말한다. 이 주파수 대역에서 전파의 어려움은 간과해서는 안된다.

### 4. 투명한 대기에 의한 흡수

투명한 대기를 통한 전달은 산소 분자와 수증기에 의한 감쇄에 영향을 받는다. 22GHz에서 감쇄 최고치는 물분자의 단일 회전 천이에 기인한다. 즉, 약 60GHz의 최고치는 많은(43) 산소 흡수 라인인, 중요한 역할을 하는 더 낮은 대기에서 퍼지는 압력 효과를 가져온다. 단지 심각한 가스 흡수는 55 - 75GHz와 118GHz지역에서 산소에 의해서, 또는 약 125GHz상에서 수증기에 의해서 이루어진다.

## IV. 전리층을 통한 전파

전리층은 대기의 일부분이며 50km이상의 높이에 존재한다. 그곳에서는 이온과 전자가 무선파의 전파에 영향을 미칠 정도로 충분한 양이 존재한다. 약 30MHz이하의 주파수에서는 장거리전송이 전리층의 반사로 가능하다. 30 - 100MHz범위의 주파수에서는 산발적인 전리층으로부터의 반사와 대기의 이온화

에 의한 강하고 간헐적인 전파뿐만 아니라, 전리층의 산란에 의한 규칙적이고 약한 전파가 얻어진다.

1. 전리층의 물리적인 표현

전리층에는 무선파의 전파에 영향을 미치는 4개의 주요 층이 있다.

1) D 영역

D영역은 50 - 90km의 높이에 존재한다. 이곳은 중성의 gas와 충돌하는 낮은 전자밀도가 있으며, 주로 통과하는 무선파를 흡수하지만 vlf와 lf전파에 대한 상층경계를 제공하기 위해 충분한 반사를 하고, vhf에서 파를 산란시키기 위해 매우 불규칙적이고 거칠다.

2) E 영역

E영역은 90-130 혹은 - 140 km까지 존재하며 낮 시간에는 대부분이 태양의 자외선과 x선에 의해 이온화되고, 밤시간에는 우주선과 유성에 의해 약간 이온화된다. 100km근처의 최대 전자밀도를 가진 규칙적인 E 층은 낮시간의 hf전파와 밤시간의 mf와 if전파에 중요한 반사매질이다.

3) F 영역

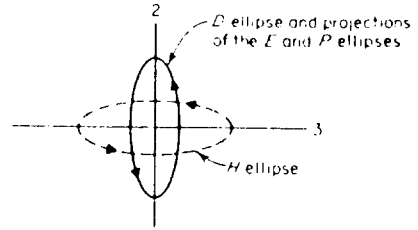
F 영역은 130 - 140 km위의 위치에 존재한다. 고주파전파에 가장중요하다. F 지역은 F1층과 F2층으로 나뉜다. F1층은 낮시간동안 175 -220 km에 주로 존재하며, 그 특성이 상당히 규칙적이라도 모든 곳에서 관찰할 수는 없다. F1층은 태양의 이온화에 의존하지만 또한 전리층이 교란되는 동안 널리 퍼져 있게 된다. F2층은 200 - 400km 상의 높이에 존재하며, 장거리 고주파통신의 주요한 반사층이며 가장 복잡하고 다양한 특성을 가지고있다.

2. 편파

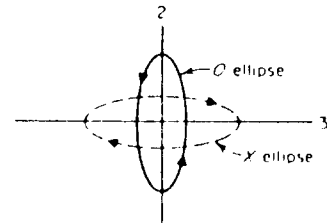
이온화된 매질에서 중요한 측면은 편파이다. 전리층의 E, F지역을 통한 고주파의 무선파의 전파에 대해서 편파는

$$R = \frac{i}{2Y_L} \left[ \frac{Y_T^2}{1-X} \sqrt{\frac{Y_T^4}{(1-X)^2} + 4Y_L^2} \right]$$

R은 그림 3 에서 필드벡터  $H_2/H_3=E_2/E_3=P_3/P_2$  의 비율이다. 편파 R 은 2와 3축을 따라서 변위벡터 D 의 진동과 전기장 E와 전력 P사이에 진폭율과 위상차를 제공한다.



(a) 파의 편향, D와 H 타원



(b) 정상파와 비정상파에 대응하는 타원사이의 관계

그림 3. 편파 타원

1) 임계주파수

전자밀도가  $\mu$  가 0으로 갈 수 있도록 충분히 크다면 직각으로 입사되는 파는 반사될 것이다. 만약 그렇지 않다면 그 파는 그 층을 투과할 것이다. 직각 입사에서 층으로부터 반사될 수 있는 최고주파수를 임계주파수라한다. 정상파의 임계주파수  $f_0$  는 최고 전자밀도의 수치와 연관되어 있다.  $f_0 F_2$  는 F<sub>2</sub>층에서의 임계주파수이다. 그리고 N과 다음과 같은 관계가 있다.

$$N_{max} = 1.24 \times 10^{10} f_0^2 \quad \text{electrons/m}^3$$

여기서  $f_0$ 는 MHz단위이다.

3. 전파속도

파의 위상속도는 다음과 같다.

$$v = \frac{v_0}{\mu} = v_0 \left( 1 - N \frac{e^2}{n \epsilon_0 \omega^2} \right)^{-1/2}$$

매질에서의 파의 위상속도가 파의 주파수의 함수일 때 그 매질을 산란매질이라 말한다.

#### 4. 150kHz이하의 주파수에서의 전파

150 kHz이하의 주파수 범위에서의 전송은 지구와 더 낮은 전리층에 의해 둘러싸인 지역안에 있다. ELF파( $f < 3$  KHz)는 지구표면아래의 그 투과깊이 때문에 지구물리학상의 관심대상이며, 또한 깊은 해저 잠수함의 중요한 통신수단이다. VLF파는 대개 장거리 통신과 항해에 이용된다. 바다밑이나 지구표면 아래에서의 제한된 전파는 이러한 낮은 주파수에서 가능하다.

#### 5. 150 - 1500 kHz에서의 전파

안정되고, 단지 적당하게 감소하는 지상파와 밤시간때의 효과적인 전리층의 반사로 인해 이러한 범위의 주파수는 해상통신과 항해, 그리고 매질 영역범위의 방송에 사용된다. 항공기와 고정된 통신과 라디오 위치 서비스가 세계의 많은 지역에서 운영되고 있다.

#### 6. 3 - 30MHz의 높은 주파수에서의 전파

1920년대 초부터 현재까지 고주파의 전파는 장거리 통신에 사용되어왔다. 매질과 낮은 주파수(300KHz - 3MHz)에서의 전파는 낮 시간동안 상당히 흡수되어버리고 30MHz이상의 주파수는 전리층에 의해 반사되어버린다. 3 - 30MHz의 주파수는 대개 밤과 낮에 전리층 반사를 하게 된다.

HF전파는 다음과 같은 것으로 특징 지워진다.

- 1) 동작 주파수의 빈번한 변화를 요구하는 전파 환경의 변화
- 2) 전리층 폭풍에 의한 방해
- 3) 가장 많은 수의 가능한 전파 경로와 그 결과의 다중 경로간섭효과

4) 산란과 주파수왜곡

5) 크고 빠른 위상변동

6) 커다란 간섭

#### 7. 전리층으로부터의 산란

30 - 300MHz이상의 주파수에서는 전리층의 전자 밀도가 전파를 반사하기에는 충분하지가 않다. 규칙적인 F와 산발적인 E가 이러한 대역폭에서 자동차, 방송, 그리고 다른 서비스에 대한 장거리간섭의 중요한 원인이 되기에, 충분한 반사를 제공하더라도 전송은 주로 산란에 의해서 일어난다.

## V. 결론

약 30MHz 이하의 주파수에서 비전리층을 통한 전파는 자유공간의 복사, 접지면 반사, 지구표면의 회절의 영향을 받고 있다. 또한 이 주파수대에서는 전리층 반사로 장거리 통신이 가능하다.

30MHz 이상의 주파수에서의 전자파 전파는 자유공간 복사, 대기층으로부터의 굴절, 반사, 그리고 접지면과 여러가지 장애물에 의한 반사, 나무나 건물에 의한 에너지 흡수, 구름에 의한 회절, 대기의 불규칙성에 의한 산란, 대기의 구성물에 의한 흡수등에 의해 좌우된다.

지형과 기상학적인 조건은 대류권을 통한 전파의 세기와 감쇄 성질을 결정하는데 중요한 역할을 한다. 수증기, 수분입자, 그리고 산소에 의한 산란과 흡수 효과는 10GHz이상에서는 지배적이다. 🌐

筆者紹介
------



金正祺

1942年 5月 5日生

1965年 2月 연세대학교 전기공학과 (공학사)

1969年 2月 연세대학교 대학원 (공학석사)

1975年 2月 연세대학교 대학원 (공학박사)

1977年 3月 중앙대학교 전자공학과 교수

1982年 12月 ~ 1983年 12月 미국 Cornell 대학교 객원연구원

1990年 1月 한국통신학회 이사

1994年 5月 한국전기통신공사 비상임이사

주관심 분야 : 안테나 및 전자파 기술