

표면파 성분을 고려한 해면전파 현상에 관한 연구

A Study on Phenomena of Sea Propagation Considering Surface Wave

서수덕* · 이민수**

Sue-dug Seo* · Min-soo Lee**

요 약

일반적인 수직 다이폴 안테나에 대한 전자계 해석은 공간파 성분을 주로 다루고 있다. 하지만 공간파 성분만을 고려하면 수신점이 매질 표면에 가까울수록 수신 전계강도가 급격히 떨어진다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 보완하기 위해 표면파 성분을 공간파 성분과 함께 고려하였다. 표면파 성분을 유도하기 위해 벡터 포텐셜을 각 스펙트럼으로 변환하여 해석하면 최종적인 전계식에 공간파 성분과 표면파 성분이 포함된다. 이러한 최종전계식을 이용하여 해면에서 나타나는 표면파 영향을 분석하고 그래프를 통하여 해면전파 현상에 영향을 미치는 요소에 대해 세부적으로 고찰하였다. 또한 이동 통신 주파수대인 880.2MHz에서의 측정값을 그래프를 통해 이론값과 비교함으로써 이론식의 타당성을 입증하였다.

Abstract

In general, the electromagnetic field analysis of a vertical dipole mainly deals with the space wave. But when only the space wave is considered, as a receiving point is close to the surface of medium, the receiving electric field strength is rapidly decreased.

In this paper, to solve this problem, we considered both the surface wave and the space wave contribution. When the vector potential is used with the angular spectrum transformation method, the space wave and the surface wave are included in the final electric field expression. By using this final electric field expression, the effect of the surface wave is analyzed through simulations and the factors having effect on a propagation phenomenon of sea surface are studied in detail. Also, the justification of the theoretical formula was proved by comparing theoretical values with measuring ones at 880.2MHz which is the frequency of mobile communication.

I. 서 론

수직 다이폴과 같은 전 방향성 안테나가 불완전

매질 평면 위에 있을 때 원거리 영역에서의 일반적인 전자계 해석 방법은 직접파와 반사파의 중첩인 공간파 성분을 주로 다루고 있다. 일반적으로 공간파 성분은 매질이 완전 도체에 가까운 경우를 제외하고는 매질 표면에서 감소하는 성질을 갖기 때

*제주대학교 통신공학과(Dept. of Tele-communication Eng., Cheju Univ.)

**대진대학교 전파공학과(Dept. of Radio Science & Eng., Dae jin Univ.)

†이 논문은 1995학년도 대진대학교 학술연구비 지원에 의한 것임.

· 논문번호 : 96-3-034

· 접수일자 : 96년 8월 6일

문에 매질 표면에서 영향을 미치는 표면과 성분을 고려하지 않으면 매질 표면에서의 수신 전력값이 급격히 떨어지는 부정확한 결과가 발생한다[1]. 따라서 전자파 분야의 많은 공학적인 응용을 위해서는 공간파와 표면파 성분을 같이 고려함으로써 전계식에 대한 좀더 정확한 수학적 접근이 필요하다. 이러한 표면파 성분에 대한 수학적 표현은 일반적인 벡터 포텐셜을 평면파에 대한 각 스펙트럼으로 변환시킴으로서 나타낼 수 있다[2]. 각 스펙트럼 표현에 대한 의미는 모든 영역에서의 3차원적인 필드 해석이 가능하고 각의 범위를 복소수 영역으로 확장 시킴으로써 매질 속으로는 전파되지 않고 단지 축적되는 유도 전계 성분을 동시에 고려할 수 있는 이점이 있다[3][4]. 또한 평면파에 대한 각 스펙트럼 표현식을 수학적 항등식을 이용하여 원통과 형태의 스펙트럼으로 변환함으로써 원거리 영역에 대한 전계식 유도가 가능하다[2].

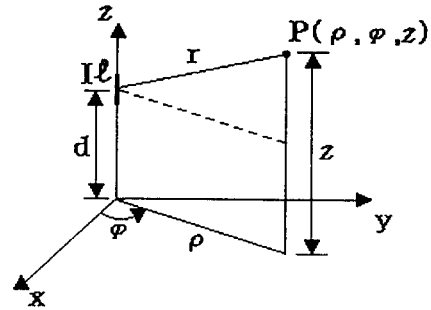
본 논문에서는 거리에 반비례하는 공간파 성분과 거리의 제곱에 반비례하는 표면파 성분이 이론식에서 분리되어 표현된다. 이론식의 그래프 표현을 통하여 여러 매질 중 해면에서의 표면파의 영향이 가장 큼을 보이고 해면에서 표면파에 영향을 미치는 주파수 및 거리와 송신 안테나 높이에 따라 달라지는 해면전파 특성을 고찰한다. 또한 이동통신 주파수인 880.2MHz에서의 측정값과 이론값을 비교함으로써 이론식의 타당성을 분석한다.

II. 불완전 매질 평면 위에서의 표면파를 고려한 전계

2-1. 벡터 포텐셜의 스펙트럼 표현

z 축상에 $I\ell$ 전류원을 갖는 수직 다이폴이 그림 1 과 같이 매질 평면으로부터 d인 높이에 있을 때 P점에서의 일반적인 벡터 포텐셜식은 다음과 같다.

$$A_z = \frac{\mu_0 I \ell}{4\pi} \frac{\exp(-jk_0 r)}{r} \quad (1)$$



[그림 1] 높이 d에 위치한 수직 다이폴
[Fig. 1] Vertical dipole at height d.

여기서 $k_0 = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$ 이고 $r[\rho^2 + (z-d)^2]^{1/2}$ 이다.

식(1)은 전류원으로부터 r만큼 떨어진 관찰점 P에서 나타나는 전위를 표현한 식이며 식(1)을 이용하여 직접파와 반사파의 합성으로 표현한 일반적인 전계식은 수신 전력이 매질 표면에서 급격히 떨어지는 특성을 갖는다. 따라서 좀더 정확한 전계식 표현을 위해서는 평면파가 매질 표면에 반사될때 생기는 표면파 성분이 고려되어야 한다. 이러한 표면파 성분은 식(1)을 다음 식과 같이 평면파에 대한 각 스펙트럼으로 변환하므로써 유도되어진다.

$$\frac{\exp(-jk_0 r)}{r} = -\frac{jk_0}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2+j\pi} \exp[-jk_0(x \sin \alpha_0 \cos \beta_0 + y \sin \alpha_0 \sin \beta_0 + |z-d| \cos \alpha_0)] \sin \alpha_0 d\alpha_0 d\beta_0 \quad (2)$$

여기서 α_0 와 β_0 는 각각 양각과 방위각을 의미한다. 또한 식(2)를 양각과 방위각에 대한 수학적인 항등식에 따라 원통형파로 변환할 수 있다.

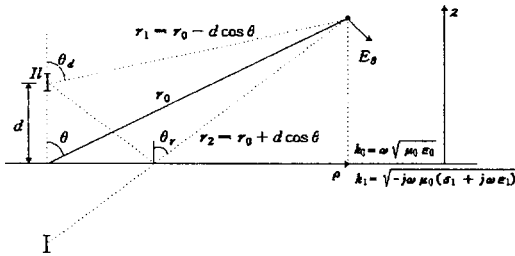
함수의 변환을 간단히 하기 위하여 직각 좌표 성분을 원통 좌표 성분으로 다음과 같이 대치한다.

$$\begin{aligned} x &= \rho \cos \varphi \\ y &= \rho \sin \varphi \\ k_0 \sin \alpha_0 &= \lambda \\ jk_0 \cos \alpha_0 &= (\lambda^2 - k_0^2)^{1/2}, \text{Re}(\lambda^2 - k_0^2)^{1/2} > 0 \end{aligned} \quad (3)$$

식(3)을 식(2)에 대입하여 식을 간략화 시키면 다음과 같이 된다.

$$A_z = \frac{\mu_0 I l}{4\pi} \int_0^\infty J_0(\lambda \rho) \exp[-(\lambda^2 - k_0^2)^{1/2} |z - d|] \frac{\lambda d \lambda}{(\lambda^2 - k_0^2)} \quad (4)$$

식(4)는 원통형파를 나타낸 스펙트럼 표현식으로 베셀함수 $J_0(\lambda \rho)$ 의 진폭 변화량을 갖고 z방향으로 전파해 나가는 진행파를 나타낸다.



[그림 2] 평탄한 불완전 매질 평면 위의 높이 d에 위치한 수직 다이폴

[Fig. 2] Vertical dipole over imperfect flat medium at height d.

[그림 2]는 높이 d인 무한 평면 위에 수직 다이폴이 놓인 경우에 대한 영상 등가 전류원을 나타낸 그림이다.

평면으로부터 임의의 관찰점 z점에 복사된 전위는 전류원 I 과 영상 등가전류원에 의하여 전파된 양으로 나타낼 수 있다.

$$A_z = \frac{\mu_0 I l}{4\pi} \left\{ \int_0^\infty J_0(\lambda \rho) \exp[-(\lambda^2 - k_0^2)^{1/2} |z - d|] \frac{\lambda d \lambda}{(\lambda^2 - k_0^2)^{1/2}} + \int_0^\infty R(\lambda) J_0(\lambda \rho) \exp[-(\lambda^2 - k_0^2)^{1/2} (z + d)] \frac{\lambda d \lambda}{(\lambda^2 - k_0^2)^{1/2}} \right\} \quad (5)$$

식(5)에서 $R(\lambda)$ 는 매질 평면에서의 반사 계수로써 다음과 같이 표현된다.

$$R(\lambda) = \frac{k_1^2(\lambda^2 - k_0^2)^{1/2} - k_0^2(\lambda^2 - k_1^2)^{1/2}}{k_1^2(\lambda^2 - k_0^2)^{1/2} + k_0^2(\lambda^2 - k_1^2)^{1/2}} = -1 + \frac{2k_1^2(\lambda^2 - k_0^2)^{1/2}}{k_1^2(\lambda^2 - k_0^2)^{1/2} + k_0^2(\lambda^2 - k_1^2)^{1/2}}, k_1^2 = -j\omega\mu_0(\sigma_1 + j\omega\epsilon_1) \quad (6)$$

여기서 k_1 은 불완전 매질에서의 전파상수이다. 식(6)을 식(5)에 대입하고 정리하면 다음과 같다.

$$A_z = \frac{\mu_0 I l}{4\pi} \left\{ \frac{\exp(-jk_0 r_1)}{r_1} - \frac{\exp(-jk_0 r_2)}{r_2} + V \right\} \quad (7)$$

$$V = \int_0^\infty \frac{2k_1^2}{k_1^2(\lambda^2 - k_0^2)^{1/2} + k_0^2(\lambda^2 - k_1^2)^{1/2}} J_0(\lambda \rho) \exp[-(\lambda^2 - k_0^2)^{1/2} (z + d)] \lambda d \lambda \quad (8)$$

식(7)에서 첫 번째 항은 수직 다이폴 안테나로부터 직접 발생된 파이고 두 번째 항은 영상 안테나로부터 발생된 파이다. 세 번째 항 V 는 근거리 영역에서 지배적으로 나타나는 표면파 성분을 의미한다.

이 표면파 성분을 다음과 같이 프레넬 적분을 포함하는 식으로 표현하면

$$V = \frac{2\exp(-jk_0 r_2)}{r_2} \left\{ 1 - j \frac{k_0^2}{k_1} \left(\frac{\pi \rho}{k_0} \right)^{1/2} \exp(jP_z) F(\sqrt{P_z}) \right\} \quad (9)$$

$$P_z = \frac{k_0}{2k_1^2 \rho} [k_0 \rho + k_1 (z + d)]^2 \quad (10)$$

$$F(\sqrt{P_z}) = \frac{(1-j)}{2} - [C(\sqrt{P_z}) - jS(\sqrt{P_z})] \quad (11)$$

이 된다.

2-2. 원거리 영역에서의 전개

관찰점이 전류원으로부터 멀어질 때 원통형파는 모든 구면에서 점차 평면파로 바뀌게 된다.

원통좌표계 (ρ, φ, z) 로 표현된 전개식을 구좌표계 (r_0, ρ, φ) 로 변환하여 전개식 θ 성분을 표현하면 다음과 같다.

$$E_\theta(r_0, \theta) = E_\rho(\rho, z) \cos \theta - E_z(\rho, z) \sin \theta \quad (12)$$

식(7)과 식(9)으로부터 $E_\rho(\rho, z)$ 와 $E_z(\rho, z)$ 은 구할 수 있지만 전개식을 완전한 r_0, θ 에 대한 함수로 표현하기 위해서는 식(11)에 대해 다음과 같은 근사식이 필요하다.

$$C(\sqrt{P_z}) \sim \frac{1}{2} + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left\{ \frac{\sin P_z}{\sqrt{P_z}} - \frac{\cos P_z}{2(\sqrt{P_z})^3} \right\} \quad (13)$$

$$S(\sqrt{P_z}) \sim \frac{1}{2} + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left\{ \frac{\cos P_z}{\sqrt{P_z}} - \frac{\sin P_z}{2(\sqrt{P_z})^3} \right\}$$

복사 거리 ρ 가 안테나의 높이 d 와 수신점 z 에 비해 매우 크다면, 즉

$$\rho^2 \gg (z-d)^2, \quad \rho^2 \gg (z+d)^2 \quad (14)$$

일 때 거리의 위상 성분과 크기 성분에 대한 근사식은 다음과 같다.

$$r_1 \approx r_0 - d \cos \theta, \quad r_2 \approx r_0 + d \cos \theta$$

$$r_1 \approx r_2 \approx r_0 \quad (15)$$

식(12)~식(15)를 이용하여 원거리 영역에서의 $E_\theta(r_0, \theta)$ 를 구하면 다음과 같이 구할 수 있다.

$$E_\theta(r_0, \theta) = \frac{\omega \mu_0 I l}{2\pi k_0} e^{-jk_0 r_0} \left\{ \frac{jk_0}{r_0} \left[\frac{k_1 \sin \theta \cos \theta}{k_0 \sin \theta + k_1 \cos \theta} \right. \right.$$

$$\left. \left. \left\{ \left(\sin^2 \theta - \frac{k_0}{k_1} \cos \theta \right) \times \cos(k_0 d \cos \theta) + \frac{jk_0 \sin(k_0 d \cos \theta)}{k_1 \cos \theta} \left(\sin \theta + \frac{k_1}{k_0} \cos^3 \theta + \cos^2 \theta \right) \right\} \right] \right. \\ \left. + \frac{k_1^2 \sin^3 \theta \left[\sin^2 \theta - \left(\frac{k_0}{k_1} \right) \cos \theta \right]}{r_0^2 k_0^2 \left[\sin \theta + \left(\frac{k_1}{k_0} \right) \cos \theta \right]^3} e^{-jk_0 d \cos \theta} \right\} \quad (16)$$

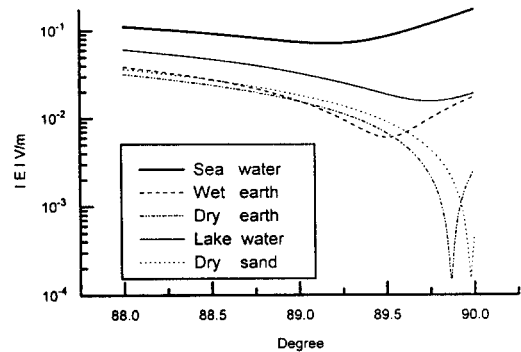
식(16)에서 (jk_0/r_0) 와 곱해진 항은 공간과 성분이며 $(k_1^2/k_0^2 r_0^2)$ 와 곱해진 항은 표면파 성분을 의미한다. 따라서 표면파는 거리의 제곱에 반비례함을 알 수 있다.

수직 다이폴 안테나가 경계면에 매우 가까이 있을 때, 즉 $d \sim 0$ 이고 $\theta \sim \frac{\pi}{2}$ 일 때 식(16)은 다음과 같다.

$$E_\theta(r_0, \theta) = \frac{\omega \mu_0 I l k_1^2}{2\pi k_0^3} \frac{e^{-jk_0 r_0}}{r_0^2} \quad (17)$$

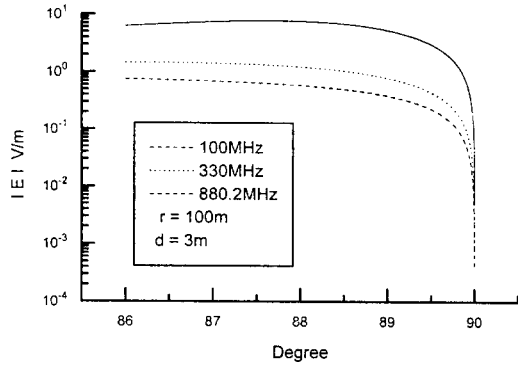
식(17)은 공간과 성분은 완전히 사라지고 표면파 성분만 존재하고 있음을 나타낸다.

표면파는 거리의 제곱에 반비례하지만 굴절률(k_1^2)



[그림 3] 굴절률 분포에 따른 표면파 영향

[Fig. 3] Surface wave effect depending on refractive index distribution.



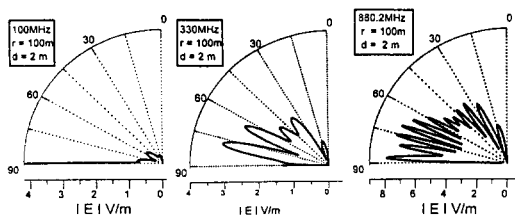
[그림 4] 주파수 변화에 따른 공간파 성분의 변화
 [Fig. 4] Space wave change depending on frequency change.

k_0^2 값이 크면 원거리 영역에서도 영향을 미친다. 따라서 [그림 3]에서 알 수 있듯이 굴절률 값이 큰 해수면에서는 표면파 영향이 크고 굴절률 값이 작은 사막에서는 표면파 영향이 작게 나타난다.

III. 해면에서의 표면파 영향

3-1. 주파수에 따른 표면파 영향

[그림 4]는 주파수가 각각 100MHz, 330MHz, 880.2MHz일 때 공간파 성분만을 대수 간격으로 나타낸 것으로 90°에 가까울수록, 즉 매질 표면 부



[그림 5] 주파수 변화에 따른 수신전계의 극좌표 표현
 [Fig. 5] Polar expression depending on frequency change.

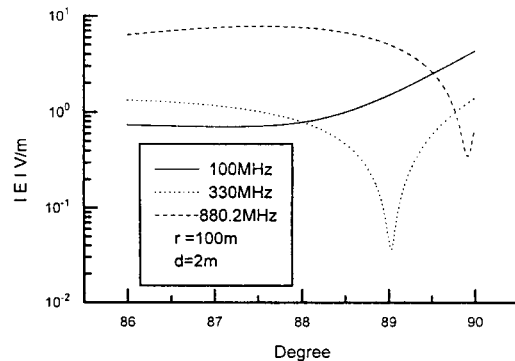
근에서 전체의 크기가 급격히 감소하고 있음을 알 수 있다.

[그림 5]는 식(16)을 극좌표 그래프로 나타낸 것으로 주파수가 높을수록 부엽의 수가 증가하고 표면파 성분은 90°로 접근한다. 주파수가 가장 낮은 100MHz에서 표면파의 성분은 공간파 성분에 비해 상당한 크기로 나타나고 있다. 330MHz, 880.2MHz의 주파수에 대해서는 극좌표 그래프로는 표면파 성분을 볼 수 없기 때문에 [그림 6]과 같이 90°부근을 다시 대수 간격으로 표시하였다[4].

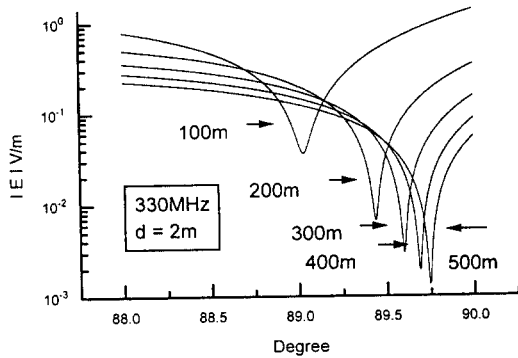
[그림 6]에서 알 수 있듯이 880.2MHz에서는 표면파 성분은 무시할 정도로 적은 반면 100MHz에서는 공간파에 의한 수신 전력보다 표면파에 의한 전력값이 훨씬 큰 값으로 나타나고 있다. 즉 주파수가 낮을수록 표면파 영향이 큼을 알 수 있다. 또한 동일주파수일 경우 [그림 7]에서 보는 바와 같이 거리가 짧아질수록 표면파 성분이 증가한다. 따라서 셀의 서비스 영역이 작은 마이크로파셀 설계에 있어서는 표면파 성분을 고려하여야 한다.

3-2. 거리에 따른 표면파 영향

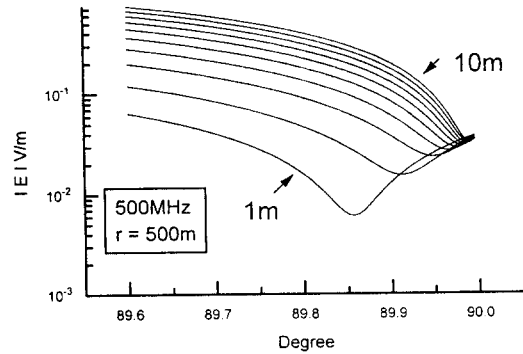
[그림 7]은 송신 안테나 높이를 2m로 하고 폐이저 주파수(330MHz)에 대해 송·수신점 간의 거리



[그림 6] 주파수 변화에 따른 표면파 영향
 [Fig. 6] Surface wave effect depending frequency change.



[그림 7] 거리 변화에 따른 표면파 영향 비교
[Fig. 7] Surface wave effect depending on distance change.



[그림 8] 송신 안테나 높이 변화에 따른 표면파 영향
[Fig. 8] Surface wave effect depending on height change of transmission antenna.

를 100m에서 500m까지 증가시켰을 때 전계값의 변화를 나타낸 그림이다. [그림 7]로부터 거리가 멀수록 공간파 성분보다 표면파 성분의 크기가 두드러지게 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 공간파 성분은 거리에 비례하여 감소하는 반면 표면파 성분은 거리의 제곱에 비례하여 감소하기 때문이다. 공간파 성분이 감소하고 표면파 성분이 나타나기 시작하는 최소점의 위치가 90°로 접근하고 있는 이유는 식(16)에서 거리변화에 따라 θ 값이 변하기 때문이다. 따라서 송·수신점간의 거리가 멀수록 표면파 성분은 매질표면에 근접한 곳에서 거리 제곱에 반비례한 크기로 나타난다.

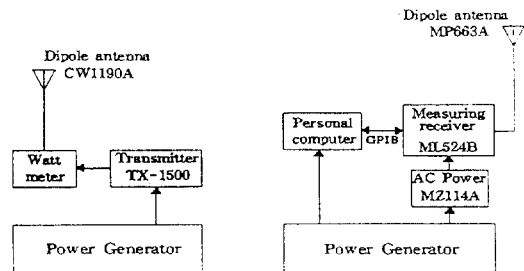
3-3. 송신 안테나 높이에 따른 표면파 영향

[그림 8]은 500MHz에서 송·수신점간의 거리가 500m일 때 송신 안테나를 1m간격으로 1m에서 10m까지 증가시켰을 때 전계의 크기를 표현한 그래프로 θ 가 90°일때의 표면파 크기는 변하지 않지만 수신전력은 거의 공간파에 의해서 좌우되고 있다.

IV. 측정 시스템 및 전파 환경

해면에서의 전파 특성을 분석하기 위해 측정에 사용된 송·수신 장치를 [그림 9]에 나타내었다.

송신단은 다이폴 안테나, Wattmeter, 75 Ω dummy load, 최대출력 50W인 소형 송신기로 구성하였다. 수신단은 다이폴 안테나와 주파수 범위가 25MHz에서 1GHz인 전계강도 측정기를 GPIB 카드가 연결된 퍼스널 컴퓨터에 연결하여 구성하였다. 송·수신기 및 안테나 제원은 <표 1>과 같다.



[그림 9] 측정 시스템 블록도
[Fig. 9] Block diagram of measurement system.

<표 1> 송·수신기기및 안테나 제원

<Table 1> Transmitter-receiver equipment and antenna parameter

	전력	주파수 (MHz)	안테나	이득 (dB)	편파형태
송신단	0.05~50 (W)	869.04~893.37	Dipole	0	수직편파
수신단	0~108 (dBmV/m)	25~1000	Dipole	0	수직편파

<표 2> 측정 환경

<Table 2> Measurement environment

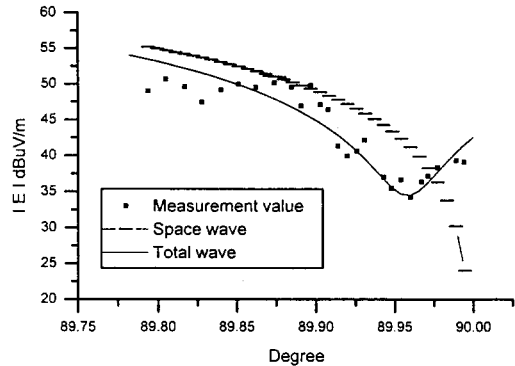
	주파수	송·수신 점거리	송신안테나 높이	수신안테나 높이	수심
측정1	880.2MHz	300m	1.5m	0.1m~2m	1.5m
측정2	880.2MHz	240m	4.5m	0.2m~16m	2m

<표 2>는 해면에서의 전파측정을 위한 측정 환경이다. 송신 주파수는 이동 통신 주파수 대역인 880.2MHz를 사용하였으며 송·수신점간의 거리는 마이크로셀 설계에 적합한 근거리 영역으로 설정하였다. 또한 측정시 송신안테나는 해면에서 5m이하의 높이로 설치하고 수신 안테나는 해면으로부터 16m까지 올라가면서 측정값을 얻었다. 이론의 타당성을 입증하기 위하여 측정된 데이터를 그래프를 통하여 이론식과 비교·분석하였다.

V. 측정 결과 및 고찰

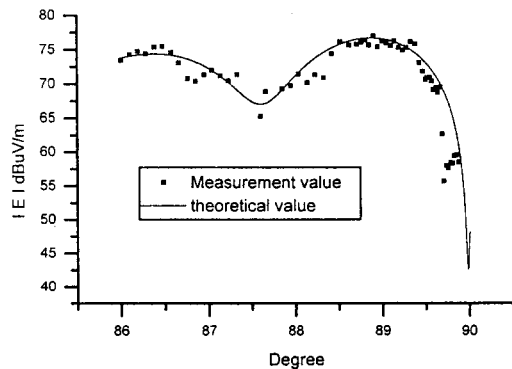
[그림 10]은 측정 1에서 얻은 측정값을 공간파 성분만을 고려한 전계식 및 공간파와 표면파를 포함한 전계식과 비교한 그래프이다. 측정값은 표면파와 공간파를 동시에 고려한 이론식에 더 잘 일치하고 있다.

[그림 11]은 측정 2에서 얻은 측정값과 이론값을 비교한 그래프이다. 안테나 높이변화에 따른 측정값은 이론값과 거의 일치하는 전계강도 값을 나타



[그림 10] 300m에서의 측정값과 이론값 비교
[Fig. 10] Comparison of measurement value and theoretical value at 300m.

내고 있다. 측정은 수신 안테나 높이를 해수면 가까이에서부터 등간격으로 올라가면서 각 높이마다 측정된 40개의 데이터를 평균내어 산출 하였다. 측정시 주변지형에 의한 반사파나 파도에 의한 산란, 얕은 수심 등에 의한 영향이 있을 것으로 예상되지만 측정값에 의한 전계패턴은 이론값과 유사하게 나타나고 있다.



[그림 11] 240m에서의 측정값과 이론값 비교
[Fig. 11] Comparison of measurement value and theoretical value at 240m.

VI. 결 론

벡터 포텐셜의 각 스펙트럼 표현법을 통하여 불완전 매질 평면 위에 있는 다이폴 안테나의 전계식을 유도하였다. 이 전계식은 공간파와 표면파를 동시에 고려할 수 있고 모든 매질에 적용할 수 있으며 매질 종류에 따라 표면파의 영향을 분석한 결과 해면에서 가장 크게 나타났다. 이론식에 대한 고찰로부터 표면파는 주파수의 영향을 가장 크게 받았으며 일정한 주파수에서는 송신 안테나 높이가 낮고 근거리일수록 표면파 영향이 커졌다. 측정 결과로부터 표면파를 고려한 전계식이 공간파만을 고려한 전계식보다 더욱 정확한 해석 방법임을 입증할 수 있었다.

본 논문에서 제시한 전계해석법은 송신 안테나의 높이가 낮고 근거리 영역에서 표면파 영향이 큰 마이크로셀 설계에 적절히 이용될 수 있다.

이 민 수



1984년 2월 : 한양대학교 전자 통신 공학과(공학사)
 1987년 2월 : 한양대학교 대학원 전자통신공학과(공학석사)
 1994년 2월 : 한양대학교 대학원 전자통신공학과(공학박사)

1995년 3월 ~ 현재 : 대전대학교 전파공학과 전임강사
 [주 관심분야] 초고주파공학, 안테나 및 전파전파

참 고 문 헌

- [1] T. S. M. Maclean and Z. Wu, *Radiowave Propagation Over Ground*, Chapman & Hall, 1993.
- [2] R. H. Clarke and John Brown, *Diffraction Theory and Antennas*, Ellis Horwood Limited, 1980.
- [3] Edward C. Jordan and Keith G. Balmain, *Electromagnetic Wave & Radiation Systems*, Prentice-Hall of India Private Limited, 1976.
- [4] R. W. P. King and Sheldon S. Sandler, "The Electromagnetic Field of a Vertical Electric dipole over the Earth or Sea" *IEEE trans.*, vol. 42, no. 3, pp. 382-389, Mar. 1994.

서 수 덕



1996년 2월 : 제주대학교 통신공학과 졸업(학사)
 1996 ~ 현재 : 제주대학교 통신공학과 석사과정
 [주 관심분야] 이동통신, 위성통신