

# 토양의 정보가 부족한 지형에 적용 가능한 중파대역 유효 대지 도전을 계산법

## A Method to Obtain Effective Ground Conductivity Value in the Middle Frequency Band where the Informations of Soil Characteristics are Insufficient

배수원 · 권세웅 · 이우성 · 문현욱 · 윤영중

Su Won Bae · Sewoong Kwon · Woosung Lee · Hyunwook Moon · Young Joong Yoon

### 요 약

본 연구에서는 주변 환경이 복잡하고 토양의 특성이 잘 알려지지 않은 지역에서는 적용이 가능한 중파대역 유효 대지 도전을 계산법을 제안하였다. 제안된 방법은 해안 기지국에서 측정된 전계 강도와 일반적인 중파대역 감쇠 모델을 이용하여 유효 대지 도전을 계산하며, 오차를 최소화하기 위해 통계적인 방법을 이용하였다. 다음으로, 제안된 방법을 이용하여 국내의 중파대역 유효 대지 도전을 얻었으며, 전계 강도 비교 및 오차 분석을 통해 제안된 방법의 정확도와 유용성을 확인하였다.

### Abstract

In this work, a new method to obtain the effective ground conductivity value in the middle frequency band where the informations of soil characteristics are insufficient was proposed. The proposed method obtained the effective ground conductivity values with the measured field strength from sea reference stations and general attenuation model in the middle frequency band. In addition, the proposed method used statistical method to minimize the error between the measurements and the predictions. Then, the effective ground conductivity in Korea peninsular was obtained by using the proposed method. Finally, it was verified that the effective ground conductivity using the proposed method is useful to predict electric field strength in the middle frequency band.

Key words : Effective Ground Conductivity, DGPS, The Middle Frequency Band

### I. 서 론

중파(middle frequency) 대역은 주파수가 300~3,000 kHz의 주파수 영역을 말하며, 항공기의 자동 유도 장치(initial localization system), AM 라디오 방송, 무선 표지 시스템(radio beacon system)등과 같은 시스템에 다양하게 사용되고 있다. 이러한 시스템들

의 안정적인 운용을 위해서는 시스템 커버리지의 분석이 필수적이며, 이를 위해서는 중파 대역 기국에서 전파하는 전계의 강도를 정확히 예측할 수 있어야 한다. 중파 대역에서는 대부분의 전력이 표면파(surface wave)를 위주로 전달되고 표면파의 감쇠 모델에서 도전율이 가장 큰 영향을 주기 때문에, 정확한 도전율 값을 얻는 것이 전계 강도 예측에 가장 중

「본 연구는 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT연구센터 지원 사업의 연구 결과로 수행되었음(IITA-2008-C1090-0801-0038)」

연세대학교 전기전자공학과(Department of Electrical & Electronic Engineering, Yonsei University)

· 논문 번호 : 20090310-026

· 수정완료일자 : 2009년 4월 8일

요하다고 할 수 있다<sup>[1],[2]</sup>. 이때 도전을 물리적인 값이 아닌 위해 측정된 전계 강도를 바탕으로 하는 유효 대지 도전율(effective ground conductivity)이 이용된다<sup>[3]</sup>. 유효 대지 도전을 실제 토양의 도전을 값이 아니라 표면파의 전파 특성을 포함하는 가상의 파라미터이며, 참고문헌 [3]에서는 유효 대지 도전을 이 주변 환경의 영향을 포함하여 나타낼 수 있다고 설명한다. 이것은 중파 대역 파장이 매우 길기 때문에 주변 환경의 영향을 표면파의 감쇠 모델에 간단히 포함시킬 수 있기 때문이다.

참고문헌 [4]에서는 Fine에 의해 제안된 미국 지형의 유효 대지 도전을 지도가 나타나 있다. 이 지도는 동일한 종류의 토양 위에서 전계 강도를 측정 후 측정된 전계 강도와 예측된 전계 강도를 비교하여 유효 대지 도전을 계산하는 방법으로 얻어졌다. 이때 같은 종류의 토양에서 여러 유효 대지 도전을 값이 계산된 경우 그 기하 평균을 취함으로써 유효 대지 도전을 결정하였다. 그러나 이러한 방법은 정확한 토양 정보(soil map)에 바탕을 두고 있기 때문에, 토양의 정보가 부족한 지역에서는 적용을 하기가 어렵다는 단점이 있다.

따라서 이번 논문에서는 토양 정보가 알려지지 않은 지역에서 중파 대역 유효 대지 도전을 얻는 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 일반적인 중파 대역 감쇠 모델을 바탕으로, 잘 알려진 해양 도전을 과 측정된 전계 강도를 이용하여 계산된다. 본 논문에서는 우선 중파 대역 감쇠 모델에 대해 나타내었으며, 다음으로 제안된 유효 대지 도전을 계산법과 설명하였다. 마지막으로 이를 통해 국내 지역에서 얻어진 유효 대지 도전을 검증하였다.

## II. 중파대역 감쇠 모델

제안된 방법에서는 예측된 중파 대역 전계 강도가 필요하며, 이를 위해 본 논문에서는 두 가지 모델을 적용하였다. 하나는 중파 대역 감쇠 모델이며, 다른 하나는 혼합 경로 모델이다. 중파 대역 감쇠 모델은 Zenneck과 Sommerfeld에 의해 그 기초가 완성되었고, Norton, Bremmer, Van der Pol 등에 의해서 발전하였으며, 다음과 같이 나타낼 수 있다<sup>[1]</sup>.

$$|E_z| = \frac{300}{r} \sqrt{P} |F| \quad (1)$$

여기서  $E_z$ 는 전계 강도(mV/m)이며,  $r$ 은 기준국으로부터의 거리(km),  $P$ 는 미소 다이폴 안테나에서 방사된 전력(kW), 그리고  $F$ 는 표면의 종류와 경로 길이에 따른 감쇠 함수이다. 식 (1)의 감쇠 함수  $F$ 는 에리 함수( $erfc$ )를 포함하고 있기 때문에 실제 수식 상에서 계산이 어려우며, 따라서 Norton은 다음과 같이 감쇠 함수를 근사식으로 나타냈다<sup>[5]</sup>.

$$F_1(p, b) = \frac{1}{2p-3.7} \quad (b < 5^\circ, p > 4.5) \quad (2-1)$$

$$F_2(p, b) = e^{-0.43p + 0.01p^2} \quad (b < 5^\circ, p \leq 4.5) \quad (2-2)$$

$$F_3(p, b) = e^{-0.43p + 0.01p^2} - \sqrt{\frac{p}{2}} \sin b e^{-5p/8} \quad (b > 5^\circ, p \leq 4.5) \quad (2-3)$$

$$F_4(p, b) = \frac{1}{2p-3.7} - \sqrt{\frac{p}{2}} \sin b e^{-5p/8} \quad (b > 5^\circ, p > 4.5) \quad (2-4)$$

여기서  $p$ 는 수치적 거리(numerical distance), 그리고  $b$ 는 각도(angle)이며, 각각 다음과 같이 계산된다.

$$x = \frac{1.8 \times 10^4 \times \sigma}{f_{MHz}} \quad (3-1)$$

$$\tan b' = (\epsilon_r - 1)/x \quad (3-2)$$

$$\tan b'' = \epsilon_r/x \quad (3-3)$$

$$p = \frac{\pi}{x} \cdot \frac{r}{\lambda} \cdot \frac{\cos^2 b''}{\cos b'} \quad (3-4)$$

$$b = 2b'' - b' \quad (3-5)$$

이때  $\sigma$ 는 지표면의 유효 대지 도전율(S/m)을 나타내며,  $r$ 은 수신단과 송신단 사이의 거리, 그리고  $\epsilon_r$ 은 지표면의 유전상수를 나타낸다.

식 (1)에서의 감쇠 모델은 단일 도전에 적용되는 식이다. 그러나 일반적으로 육상의 도전을 토양의 종류에 따라 차이가 있기 때문에 다수의 도전에서 적용될 수 있는 혼합 경로 모델이 필요하다. 이것은 ITU-R 368-7에 잘 나타나 있듯이 Millington 방식을 이용하여 계산 가능하다<sup>[6]</sup>. 이 방법은 Eckresley forward 방식과 backward 방식을 서로 조합하여 평균값을 취하는 방식으로 구할 수 있으며, 일반적으로 가장 많이 사용되는 혼합 경로 모델이다.

$$E_{tot} = \frac{1}{2} (E_{fwd} + E_{bac}) \quad (4)$$

이때  $E_{tot}$ 는 Millington 방법에 의한 전계 강도이며,  $E_{fwd}$ 는 Eckresley forward 방법에 의한 전계 강도, 그리고  $E_{bac}$ 는 Eckresley backward 방법에 의한 전계 강도이다. 따라서 식 (1)~(4)를 이용하여 중파 대역의 전계 강도를 예측할 수 있다.

### III. 제안된 유효 대지 도전을 계산 방법

앞에서도 설명하였듯이 측정된 중파 대역 전계 강도는 대지의 도전을 및 주변 환경에 영향을 받으며, 이를 포함하기 위해 유효 대지 도전을 사용된다. 본 논문에서 제안된 유효 대지 도전을 계산 방법은 참고문헌 [4]의 방법과 마찬가지로 측정된 전계 강도를 바탕으로 얻을 수 있으나, 토양의 정보가 부족한 지역에 적용이 가능하다는 장점이 있다.

제안된 계산 방법을 위해 우선 국내 전 지역에서 중파 대역 전계 강도를 측정한다. 이를 위해 본 연구에서는 현재 운용중인 위성 항법 보정 시스템(DGPS)을 이용하였다. 이는 DGPS의 동작 주파수 대역이 283.5~325 kHz로 중파 대역을 만족하고 커버리지 영역이 국내 대부분 지역을 포함하므로 중파 대역 전계 강도 측정에 적합하기 때문이다. 전계 강도 측정은 DGPS 수신기(NT-300D)를 장착한 차량을 일정한 속도(60~80 km/s)로 이동시키며 이루어졌다. 이때 이용된 수신 안테나는 루프 안테나로 파장에 비해 매우 작기 때문에 전방향성(omni-directional)의 패턴을 가진다. 수신기는 1초 간격으로 DGPS 기준국으로부터의 전계 강도를 측정하였으며, 이때 측정 위치는 위성 항법 장치(GPS)를 이용하여 파악하였다. 수신기는 해안에 위치한 8개의 DGPS 기준국(팔미도 기준국, 영도 기준국, 호미곶 기준국, 주문진 기준국, 독도 기준국, 마라도 기준국, 어청도 기준국, 거문도 기준국)의 신호를 측정하였는데, 이는 이미 잘 알려진 해양의 유효 도전율(5 S/m)을 통해 해안 기준국의 방사되는 전력을 예측하기 위해서이다. 이러한 방법으로 국내 전 지역을 이동하면서 측정된 결과 약 256,000개의 측정 데이터가 수집되었다.

다음으로 식 (1)~(4)를 이용하여 전계 강도를 예측한다. 이때 계산에 필요한 유효 대지 도전을 초기값은 ITU-R 유효 대지 도전을 이용하였으며<sup>[7]</sup>, 유전 상수( $\epsilon_r$ )는 참고문헌 [1]을 참고하여 4로 설정하고 계

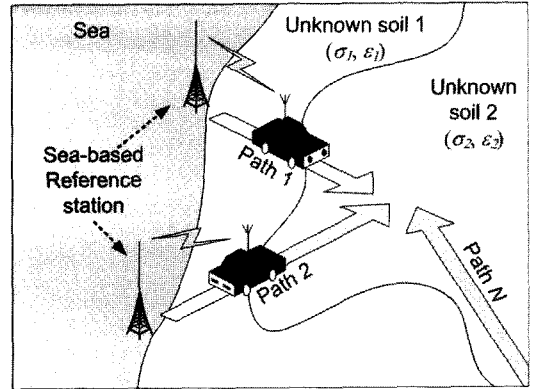


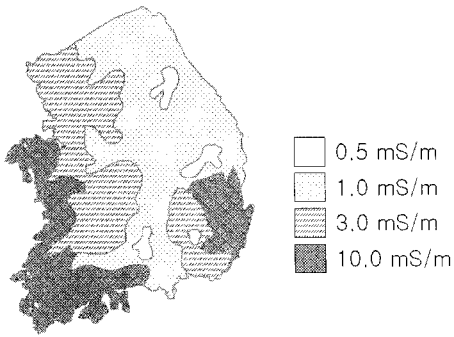
그림 1. 전계 강도 측정 경로  
Fig. 1. Measurement path of the field strength.

산하였다. 그 다음으로 측정된 전계 강도와 예측된 전계 강도를 비교한다. 이때 측정된 전계 강도와 예측된 전계 강도의 차이를 정량적으로 분석하기 위해 에러 파라미터  $M$ 을 도입한다.

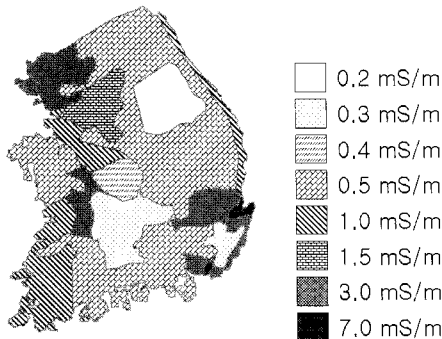
$$M = E_m(r) - E_p(r, \sigma) + N[0, \Sigma^2] \text{ (dB)} \quad (5)$$

여기서  $E_m(r)$ 은 측정된 전계 강도를 나타내며,  $E_p(r, \sigma)$ 은 예측된 전계 강도를 나타낸다. 측정된 전계 강도는 변수가 기준국으로부터의 거리( $r$ )밖에 없지만, 예측된 전계 강도는 거리( $r$ )와 유효 대지 도전율( $\sigma$ )을 변수로 가진다. 측정된 전계 강도는 거시적인 페이딩의 영향으로 정규 분포의 형태를 가지며, 따라서 식 (5)의 우변에  $N[0, \Sigma^2]$ 항이 포함되었다. 이때 예측된 전계 강도와 측정된 전계 강도가 일치한다면 에러 파라미터  $M$ 의 평균은 0 dB가 된다. 반대로 측정된 전계 강도와 예측된 전계 강도의 차이가 클수록 에러 함수의 평균은 0 dB에서 멀어지게 된다. 또한, 에러 함수의 표준편차( $\Sigma$ )가 작을수록 더 정확한 전계 강도의 예측을 의미한다.

측정된 전계 강도와 예측된 전계 강도를 통해 내륙의 유효 대지 도전을 구하는 방법은 그림 1에 나타나 있다. 우선 하나의 기지국으로부터 일직선상으로 경로를 설정하여 측정된 전계 강도와 앞에서 예측된 전계 강도를 비교한다. 실제로 도로 사정상 직선으로 수신기가 이동할 수 없기 때문에 측정 데이터를 직선상에서 추출하여 그 값을 비교하였으며, 한 면적당 표본 수가 일정하도록 데이터를 처리하였다. 다음으로 예측된 전계 강도가 측정된 전계 강도



(a) ITU-R 유효 대지 도전을 지도  
(a) Map of the ITU-R effective ground conductivity



(b) 제안된 방법으로 얻어진 유효 대지 도전을 지도  
(b) Map of the effective ground conductivity obtained from the proposed method

그림 2. 유효 대지 도전을 지도  
Fig. 2. Maps of the effective ground conductivity.

와 일치하도록 ITU-R 도전을 초기값을 수정한다. 이는 유효 대지 도전을 값이 감쇠곡선의 기울기와 연관되어 있기 때문이다. 또한, 급격히 감쇠곡선이 바뀌는 지점에서 새로운 토양을 추가하고 유효 대지 도전을 값 감쇠곡선 기울기에 일치하도록 설정한다. 이때 정확도를 높이기 위해 한 지역의 유효 대지 도전을 결정할 때 그림 1에 나타난 것과 같이 2개 이상의 해안 기준국으로부터 경로를 잡아 모든 경로에서 만족하도록 유효 대지 도전을 값을 수정한다. 이러한 방법으로 수정된 유효 대지 도전을 다시 여러 파라미터를 이용하여 오차를 분석한다. 그리고 위의 과정을 반복하여 최종적으로 수정된 유효 대지

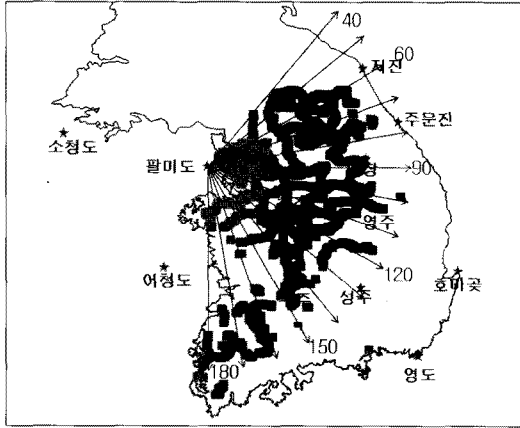
도전을 얻는다. 그림 2에는 국내의 ITU-R 유효 대지 도전을 지도와 제안된 방법으로 얻어진 유효 대지 도전을 지도를 나타냈다. 위 결과에 따르면 수정된 유효 대지 도전을 ITU-R 도전을보다 낮은 값을 가지며 더 세부적으로 구분이 되어 있음을 확인할 수 있다.

#### IV. 제안된 유효 대지 도전을 값 분석

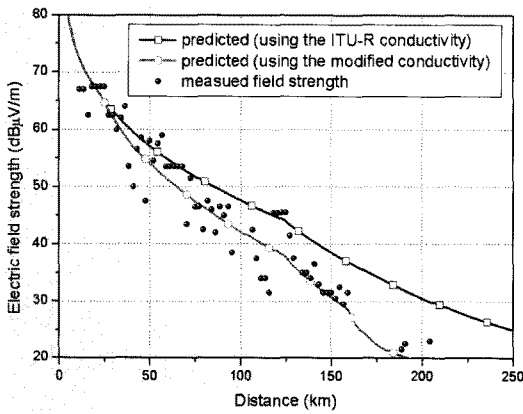
제안된 방법으로 얻어진 유효 대지 도전을 값을 검토하기 위해, 이번 장에서는 해안 기준국으로부터 측정된 전계 강도와 예측된 전계 강도를 비교하여 분석하였다. 여덟 개의 해안 기준국 중 측정 데이터가 많아 분석하기 용이한 두 곳(팔미도 기준국, 호미곶 기준국)의 결과를 그림 3과 그림 4에 각각 나타냈다.

우선 그림 3(a)는 팔미도 기준국으로부터 수신된 전계 강도를 나타낸 그림이다. 그림에서 확인할 수 있듯이, 측정 지역은 경기도와 충청도는 물론 강원도와 전라도 일부분 지역까지 포함한다. 전계 강도의 비교 경로는 그림과 같이 10° 간격으로 전 측정 지역을 구분하여 분석하였으며, 이때의 예로 100°일 때의 결과를 그림 3(b)에 나타냈다. 우선 측정된 전계 강도와 ITU-R 유효 대지 도전을 이용한 예측 결과를 비교하여 보면 측정된 전계 강도가 예측된 결과보다 낮게 나왔음을 확인할 수 있다. 따라서 예측된 전계 강도가 측정된 전계 강도에 일치하도록 ITU-R 유효 대지 도전을 값을 수정되었으며, 그 결과는 실선으로 나타나 있다. 거시적인 페이딩 때문에 측정된 전계 강도가 퍼져 있지만, 그림 3(b)에서 수정된 유효 대지 도전을 이용한 예측 결과가 측정된 결과와 일치함을 확인할 수 있다. 위 결과를 정량적으로 분석하기 위해 그림 3(c)에 여러 파라미터  $M$ 의 CDF(Cumulative Distribution function)를 나타냈다. 수정된 유효 대지 도전을의 평균이 ITU-R 유효 대지 도전을 결과보다 좀 더 0 dB에 가까움을 알 수 있으며, 기울기가 정규 분포 곡선( $\sigma^2=4$ )에 좀 더 일치함을 확인할 수 있다. 이는 전체적인 오차의 크기가 줄었으며, 그 표준편차도 줄었음을 의미한다.

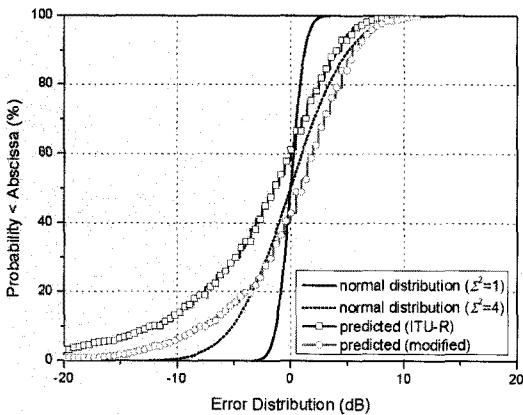
그림 4는 호미곶 기준국의 결과를 나타낸다. 그림 4(a)는 측정된 전계 강도 및 경로를 나타내었으며, 측정 지역은 경상도 전체와 강원도, 충청도, 전라도 일부를 포함한다. 전계 강도는 경로를 10° 간격으로



(a) 측정된 전계 강도 및 측정 위치  
(a) Measured electric field strength and the location

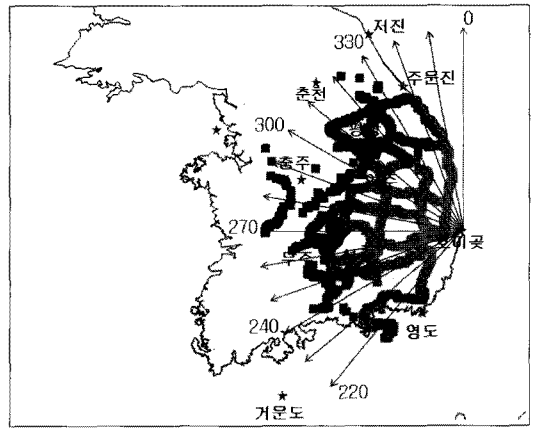


(b) 측정된 전계 강도와 예측된 전계 강도 비교(100°)  
(b) Comparison of the measured field strength and predicted field strength(100°)

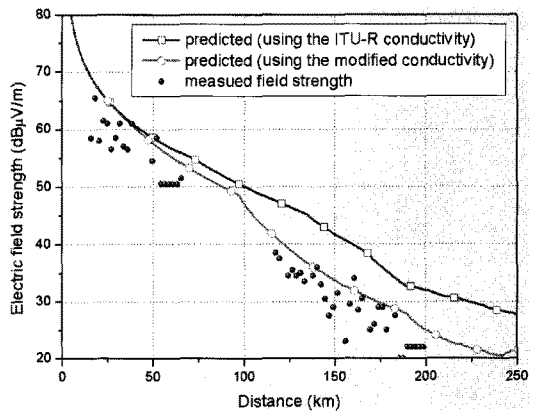


(c) 여러 파라미터 M의 CDF  
(c) CDF of the error parameter M

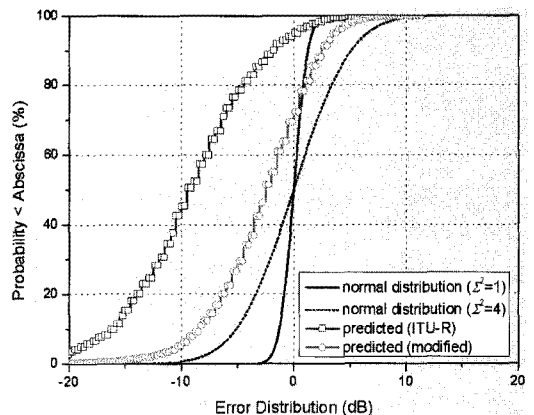
그림 3. 팔미도 기준국의 분석 결과  
Fig. 3. Results of the Palmido reference station.



(a) 측정된 전계 강도 및 측정 위치  
(a) Measured electric field strength and the location



(b) 측정된 전계 강도와 예측된 전계 강도 비교(250°)  
(b) Comparison of the measured field strength and predicted field strength(250°)



(c) 여러 파라미터 M의 CDF  
(c) CDF of the error parameter M

그림 4. 호미곶 기준국의 분석 결과  
Fig. 4. Results of the Homigot reference station.

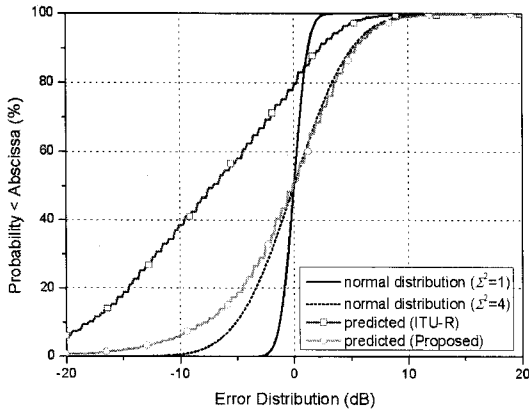


그림 5. 국내 전 지역에서의 에러 파라미터의 CDF  
Fig. 5. CDF of the error parameter in hole area.

설정하여 분석하였으며, 그림 4(b)는 250°에서의 측정된 전계 강도와 예측된 전계 강도 비교를 나타냈다.

이때 측정된 전계 강도는 그림 3(b)와 마찬가지로 ITU-R 유효 대지 도전을 이용한 예측 결과보다 낮음을 알 수 있다. 반면, 수정된 유효 대지 도전을 이용한 예측 결과는 측정 결과와 일치한다. 그림 4(c)에서는 에러 파라미터를 이용하여 정량적인 오차 분석을 하였으며, 평균이 약 7 dB 이상 개선되었으며 표준편차도 약간 감소하였음을 확인할 수 있다.

최종적으로 전 지역에서의 에러 파라미터를 분석하였으며, 그 결과를 그림 5에 나타냈다. 그 결과 수정된 유효 대지 도전을 이용한 경우 평균이 거의 0 dB에 일치하며, 또한 표준편차의 기울기도 ITU-R 유효 대지 도전을 이용한 결과보다 우수함을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 제안된 방법으로 얻어진 유효 대지 도전이 국내 중파 대역 전계 강도와 기존의 ITU-R 유효 대지 도전을보다 잘 일치하며, 향후 중파대역 전계 강도 예측에 활용될 수 있음을 나타낸다.

## V. 결 론

본 논문에서는 주변 환경이 복잡하고 토양 정보

가 알려지지 않은 지역에서 중파 대역 유효 대지 도전을 구하는 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 측정된 전계 강도와 예측된 전계 강도가 일치하도록 유효 대지 도전을 수정함으로써 얻어진다. 이를 위해 우선 해안 기지국으로부터 중파 대역 전계 강도를 측정하였으며, 에러 파라미터를 이용하여 정량적인 분석을 하였다. 이 결과 국내 지역 수정된 유효 대지 도전을 구할 수 있었다. 제안된 방법으로 얻어진 유효 대지 도전을 분석한 결과, 국내 전 지역에서의 평균이 0 dB에 일치하며, 또한 표준편차도 개선되었음을 확인할 수 있었다. 따라서, 제안된 방법은 실제 토양의 정보가 알려지지 않은 지역에서 유효 대지 도전을 값을 예측할 수 있으며, 중파대역 전계 강도 예측에 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

## 참 고 문 헌

- [1] M. P. M. Hall, L. W. Barclay, and M. T. Hewitt, *Propagation of Radiowaves*, IEE, 1996.
- [2] J. R. Wait, "The ancient and modern history of EM ground-wave", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, pp. 7-24, vol. 40, no. 5, 1998.
- [3] A. W. Biggs, "Terrain influences on effective ground conductivity", *IEEE Trans. on Geoscience Electronics*, pp. 106-114, vol. 8, no. 2, Apr. 1970.
- [4] H. Fine, "An effective ground conductivity map for continental united states", *Proceedings of the IRE*, pp. 1405-1408, vol. 42, no. 9, Sep. 1954.
- [5] R. Li, "The accuracy of Norton's empirical approximations for wave attenuation", *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, pp. 624-628, vol. 31, no. 4, Jul. 1983.
- [6] *ITU-R Recommendation P.368-7*, "Ground-wave propagation curves for frequencies between 10 kHz and 30 MHz", 1992.
- [7] *ITU-R Recommendation P.832*, "World atlas of ground conductivities", 1992.

배수원



1983년 2월: 광운대학교 통신공학과 (공학사)  
1995년 6월: 연세대학교 공학대학원 (공학석사)  
2009년 2월 : 연세대학교 전기전자공학과 (공학박사)  
[주 관심분야] 안테나, 전파전파 등

문현욱



2005년 2월: 연세대학교 기계전자공학부 (공학사)  
2007년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)  
2007년 3월~현재: 연세대학교 전자공학과 박사과정  
[주 관심분야] 안테나, 전파전파 등

권세웅



1999년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)  
2002년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)  
2002년 3월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 박사과정  
[주 관심분야] 안테나, 전파전파 등

윤영중



1981년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)  
1986년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)  
1991년 2월: Georgia Institute of Technology (공학박사)  
1992년~1993년: 한국전자통신연구원 위성통신기술 연구단

1993년~현재: 연세대학교 전기전자공학과 교수  
[주 관심분야] 마이크로파 소자, 안테나, 전파전파, EMI/EMC

이우성



2005년 2월: 연세대학교 기계전자공학부 (공학사)  
2005년 3월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 석사박사통합과정  
[주 관심분야] Reconfigurable 안테나, RFID, 소형 안테나