

# 수정된 유효 대지 도전율을 이용한 위성 항법 보정 시스템(DGPS) 기준국 커버리지에 관한 연구

## A Study on the Coverages of Reference Stations of the Differential Global Positioning System Using a Modified Effective Ground Conductivity in the Middle Frequency Band

배수원 · 권세웅 · 이우성 · 문현욱 · 윤영중 · 이용안\*

Su Won Bae · Sewoong Kwon · Woosung Lee · Hyunwook Moon · Young Joong Yoon · Yong-An Lee\*

### 요 약

위성 항법 보정 시스템(DGPS)을 설치하거나 운영하기 위해서는 시스템 커버리지에 대한 예측이 필요하다. 그러나 기존에 제안된 ITU-R 유효 대지 도전율을 이용하여 커버리지를 분석할 경우, 실제 측정된 결과와 오차가 많이 발생하기 때문에, 본 연구에서는 수정된 유효 대지 도전율 값을 이용하여 DGPS의 기준국 커버리지를 분석하였다. 수정된 유효 대지 도전율은 ITU-R 유효 대지 도전율을 기본으로 하였으며, 예측된 전계 강도와 측정된 전계 강도간의 오차를 최소화하기 위해 통계적인 방법을 이용하여 수정되었다. 다음으로 중파 대역 감쇠 모델과 수정된 유효 대지 도전율을 이용하여 현재 운용중인 DGPS의 서비스 영역을 예측하였으며, 다양한 분석을 통해 시스템의 안정성을 확인하였다.

### Abstract

The prediction of a system coverage is required to install or operate a base station of the differential global positioning system(DGPS). However, the predicted results differ from the measured results when those are analyzed using ITU-R effective ground conductivity values. Thus, in this paper, the coverages of DGPS reference stations are analyzed using the modified effective ground conductivity values. The modified effective ground conductivity is based on the effective ground conductivity of ITU-R and modified to minimize the error between the measured electric fields and the predicted electric fields by using a statistical method. Then, the DGPS system coverages are analyzed by using the modified effective ground conductivity values, and the system stability is verified with a various analysis.

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

### I. 서 론

위성 항법 보정 시스템(DGPS)은 해상이나 육상에 설치된 기준국(reference station)을 이용하여 기존의

위성 항법 시스템(GPS)에서의 오차 값을 보정해 주는 정밀 위성 위치 확인 시스템이다. 이 시스템은 주파수가 300~3,000 kHz이고, 파장이 100~1,000 m인 중파 대역에서 동작한다. 중파 대역에서는 파장이

「본 연구는 정보통신부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT연구센터 지원 사업의 연구 결과로 수행되었음(HTA-2007-C1090-0701-0038).」  
연세대학교 전기전자공학과(Department of Electrical & Electronic Engineering, Yonsei University)

\*(주)안세기술(ANSE Technologies)

· 논문 번호 : 20080312-029

· 수정완료일자 : 2008년 4월 25일

매우 길기 때문에 지면에 의한 반사파(reflected wave)와 직접파(direct wave)가 상쇄되어 대부분의 전력은 표면파(surface wave)를 통해 전달된다<sup>[1]</sup>.

DGPS 시스템이 안정적으로 동작하기 위해서는 시스템 커버리지에 대한 분석이 필요하며, 이를 위해서는 기준국에서 전파하는 DGPS 신호의 세기를 예측할 수 있어야 한다. 중파 대역에서는 대부분의 전력이 표면파를 위주로 전파하기 때문에 도전율이 경로 손실에 가장 중요한 역할을 미친다<sup>[2]</sup>. 해양 도전율(sea conductivity)의 경우, 거의 일정한 값을 갖기 때문에 전계 강도의 예측이 쉬우나, 육상 도전율(ground conductivity)은 토양의 종류에 따라 그 값이 바뀌게 되어 정확한 값을 얻는 것이 쉽지 않다. 또한, 지표면의 건물이나 산과 같은 지형적 환경 때문에 육상 도전율을 이용하여 예측된 전계 강도는 일반적으로 측정 결과와 다르게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 유효 대지 도전율(effective ground conductivity)이 사용된다<sup>[3]</sup>. 유효 대지 도전율은 실제의 도전율에 주변 환경의 영향까지 고려된 가상의 도전율 값이다. 한국 지형의 유효 대지 도전율은 ITU-R P.832에서 찾을 수 있으나<sup>[4]</sup>, 이 도전율은 매우 간략하고 오래된 자료를 이용하여 만들어진 것이기 때문에 실제 외부 측정을 통해서 검증하였을 때 만족스럽지 못한 결과를 얻는다.

따라서 본 논문에서는 국내 환경에 잘 맞도록 ITU-R의 유효 대지 도전율을 수정하였으며, 이 값을 이용하여 DGPS 시스템 커버리지를 분석하였다. 이를 위해 먼저 중파 대역 감쇠 모델을 설명하고, 다음으로 국내 환경에서 전계 강도를 잘 예측할 수 있도록 수정된 유효 대지 도전율에 대해 나타내었다. 마지막으로 수정된 유효 대지 도전율 값을 이용해 국내에서 운용 중인 DGPS의 시스템 커버리지를 분석하였다.

## II. 중파 대역 감쇠 모델

초기의 중파 모델링은 1900년대 Zenneck과 Sommerfeld에 의해 그 기초가 완성되었으며, Norton, Bremmer, Van der Pol 등에 의해서 발전하였다. Sommerfeld는 미소 다이폴을 이용하여 중파 대역 감쇠 모델을 제안하였는데, 이는 직접파와 반사파 그리고

표면파로 구성되어 있다. 일반적으로 중파 대역의 안테나의 높이는 파장에 비해 매우 낮기 때문에 직접파와 반사파는 대부분 상쇄되고 표면파만이 남아서 전파하게 된다. 이때, 표면파에 대한 전파 수식은 다음과 같이 간략화 된다<sup>[1]</sup>.

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

여기서  $E_z$ 는 전계의 강도(mV/m)이며,  $r$ 은 경로의 길이(km), 그리고  $P$ 는 미소 다이폴 안테나에서 방사된 전력(kW)이다.  $F$ 는 표면의 종류와 경로 길이에 따른 감쇠 함수이며, 다음과 같이 나타난다<sup>[1]</sup>.

$$F = [1 - j\sqrt{\pi w} \exp(-w) \{erfc(j\sqrt{w})\}] \quad (2)$$

$$w = \frac{-j2kr_2 u^2 (1 - u^2 \cos^2 \psi_1)}{(1 - R_v)^2} \quad (3)$$

$$u^2 = \frac{1}{(\epsilon_r - jx)} \quad (4)$$

$$x = \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0} = 1.8 \times 10^{10} \frac{\sigma}{f} \quad (5)$$

여기서  $erfc$ 는 에러 함수를,  $k$ 는 자유공간의 파수(wave number)를,  $r_2$ 는 반사파 경로의 길이를,  $\psi_1$ 은 반사파와 지면간의 각도를 나타낸다. 또한,  $R_v$ 는 수직 편파의 지표면에서의 반사 계수를,  $\epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0$ 은 표면의 유전상수를,  $\sigma$ 는 표면의 도전율을, 그리고  $f$ 는 주파수를 의미한다. 위의 값들을 이용하여  $F$ 를 계산한 뒤 식 (1)에 적용하여 중파 대역 전계 강도를 예측할 수 있다.

식 (1)에서의 감쇠 모델은 단일 도전율에 적용되는 식이다. 그러나 일반적으로 육상의 도전율은 토양의 종류에 따라 차이가 있기 때문에 다수의 도전율에서 적용될 수 있는 혼합 경로 모델이 필요하다. 이것은 ITU-R 368-7에 잘 나타나 있듯이 Millington 방식을 이용하여 계산 가능하다<sup>[5]</sup>. 이 방법은 Eckresley forward 방식과 backward 방식을 서로 조합하여 평균값을 취하는 방식으로 구할 수 있으며, 일반적으로 가장 많이 사용되는 혼합 경로 식이다.

$$E_{tot} = \frac{1}{2} (E_{fwd} + E_{bac}) \quad (6)$$

이때  $E_{tot}$ 는 Millington 방법에 의한 전계 강도이며,

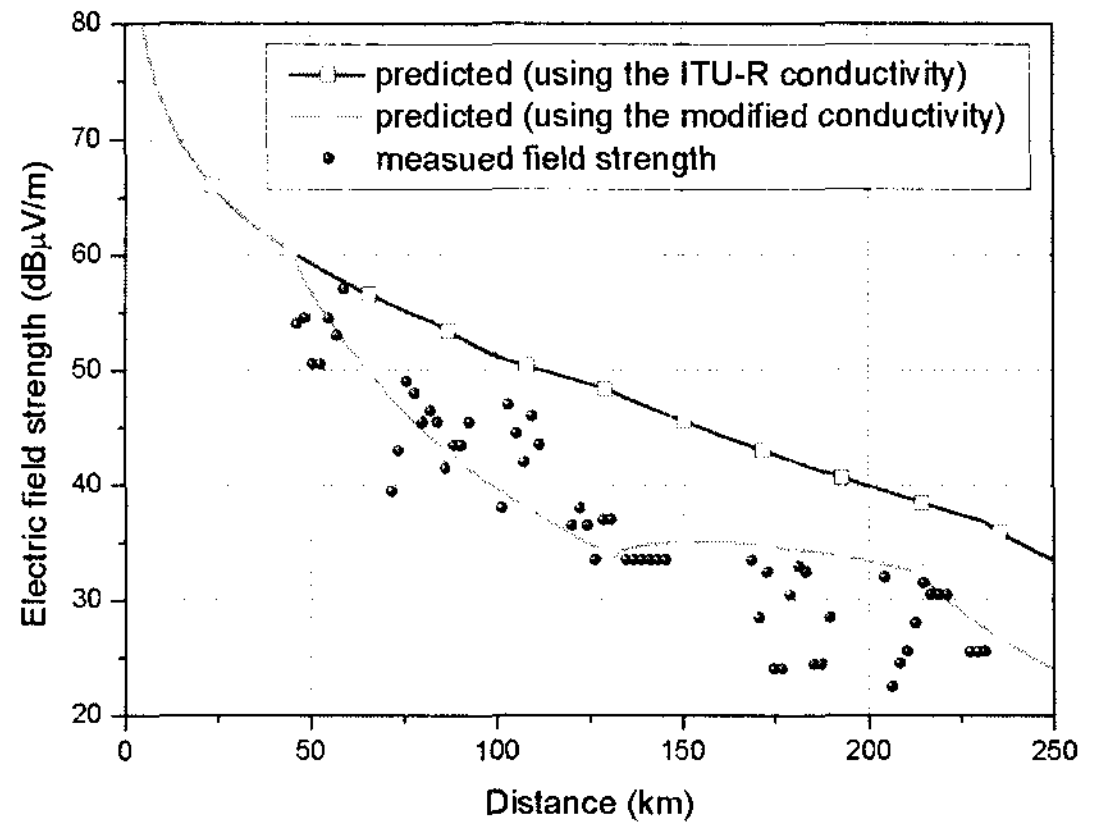
$E_{fwd}$ 는 Eckresley forward 방법에 의한 전계 강도, 그리고  $E_{bac}$ 는 Eckresley backward 방법에 의한 전계 강도이다. 따라서 식 (1)~(6)을 이용하여 중파 대역의 전계 강도를 예측할 수 있다.

### III. 수정된 유효 대지 도전을

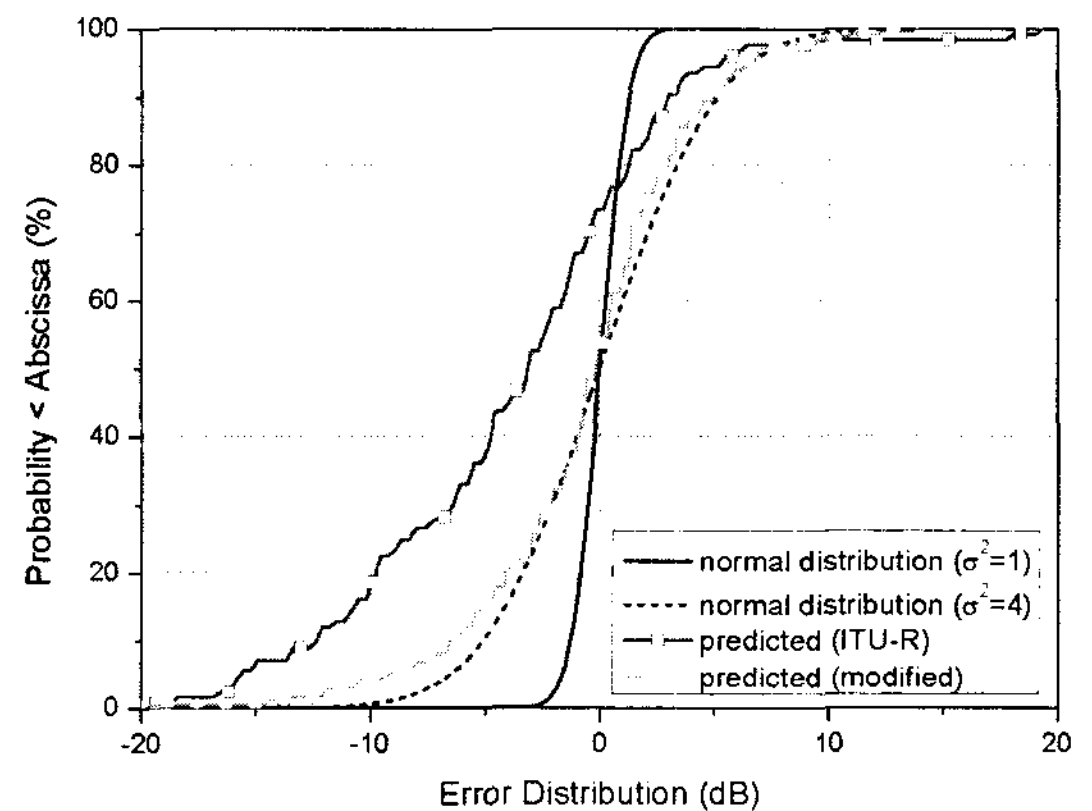
유효 대지 도전을 수정은 다음과 같은 과정을 통해 이루어졌다. 우선 국내 전 지역에서 DGPS 전계 강도를 측정하였다. DGPS 수신기가 장착된 차량을 일정한 속도(60~80 km/s)로 이동시키며, 1초 간격으로 전계 강도를 측정하였으며, GPS를 이용하여 측정 위치를 이용하여 파악하였다. 수신기는 해안에 위치한 기준국(팔미도 기준국, 마라도 기준국, 영도 기준국, 호미곶 기준국, 주문진 기준국)의 DGPS 신호를 측정하였다. 이것은 육상의 유효 대지 도전을 수정하기 위해 이미 알려진 해상의 도전을(5 S/m)를 기준으로 하기 위해서이다. 국내 전 지역을 이동하면서 측정한 결과, 약 256,000개의 측정 데이터가 수집되었다. 다음으로 식 (1)~(6)을 이용하여 전계 강도를 예측하였다. 이때 도전을 ITU-R 유효 대지 도전을 초기값으로 설정하였으며, 유전율은 참고 문헌 [1]에서 지표면의 종류에 따라 도전율과 유전 상수가 나타나 있기 때문에 이를 참고하여 4로 설정하고 계산하였다. 다음으로 측정된 전계 강도와 예측된 전계 강도의 차이를 비교하기 위하여 다음과 같이 에러함수  $M$ 을 도입한다.

$$M = E_{meas}(r) - E_{pred}(r, \sigma) \quad (7)$$

여기서  $E_{meas}(r)$ 은 측정된 전계 강도를 의미하며,  $E_{pred}(r, \sigma)$ 은 예측된 전계 강도를 의미한다. 측정된 전계 강도는 변수가 기준국으로부터의 거리( $r$ ) 밖에 없지만, 예측된 전계 강도는 거리( $r$ )와 유효 대지 도전을( $\sigma$ )을 변수로 가진다. 측정된 전계 강도는 거시적인 페이딩의 영향으로 정규분포의 형태를 가지며, 따라서 평균값을 고려해야 한다. 이때 예측된 전계 강도와 측정된 전계 강도가 일치한다면 에러 함수  $M$ 의 평균은 0 dB가 된다. 반대로 측정된 전계 강도와 예측된 전계 강도의 차이가 클수록 에러 함수의 평균은 0 dB에서 멀어지게 되며, 이것은 오차가 많이 발생함을 의미한다. 또한, 에러 함수의 표준편차



(a) 예측된 전계 강도와 측정된 전계 강도(팔미도)  
(a) Predicted and measured electric field strengths(Palmido reference station)



(b) 에러 함수의 CDF(전 지역)  
(b) CDF of error function(whole area)

그림 1. ITU-R 유효 대지 도전율과 수정된 유효 대지 도전율에 의한 전계 강도

Fig. 1. Predicted electric field strengths using ITU-R effective ground conductivity and modified effective ground conductivity.

가 작을수록 더 정확한 전계 강도의 예측을 의미한다. 따라서  $M$ 의 평균이 0 dB에 근접하고 표준편차가 최소가 되도록 ITU-R 유효 대지 도전을 값을 수정하여 국내 환경에 잘 맞는 최적의 값을 얻었다.

수정된 유효 대지 도전을의 정확도를 확인하기 위해 그림 1에 ITU-R 유효 대지 도전을 값과 수정된 유효 대지 도전을 값에 의한 결과를 비교하여 나타냈다. 우선 그림 1(a)에는 팔미도 기준국(위도: 37° 21' 29.00", 경도: 126° 20' 40.00")으로부터 무주방향(위도: 35° 54' 11.71", 경도: 127° 35' 2.53")으로

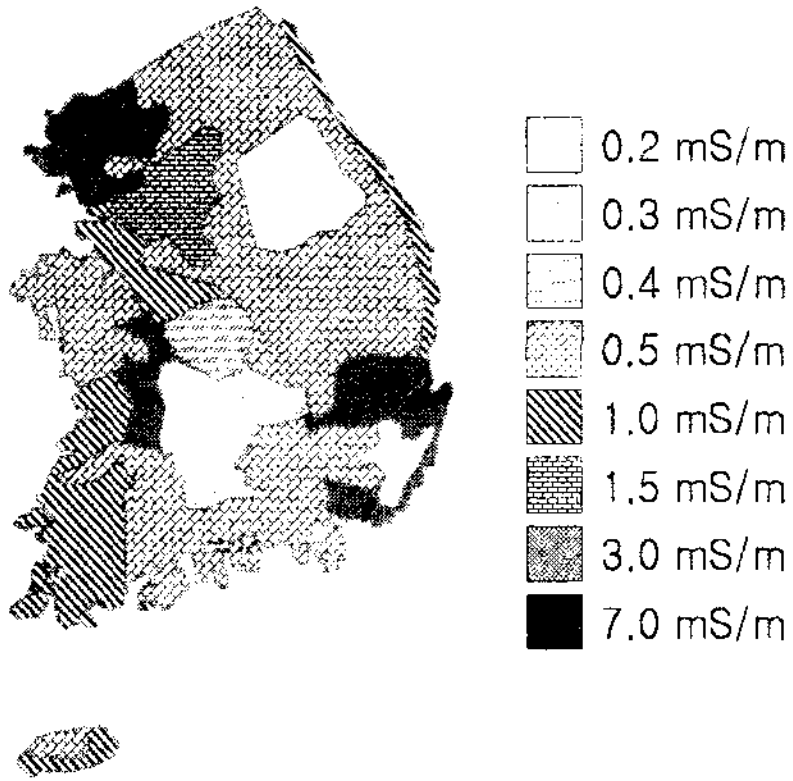


그림 2. 수정된 유효 대지 도전율 지도  
Fig. 2. Map of modified effective ground conductivity.

측정된 전계 강도와 예측된 전계 강도가 나타나 있다. 여기서 ITU-R 유효 대지 도전율로 예측된 전계 강도는 측정된 전계 강도와 오차가 많이 발생하는 반면, 수정된 유효 대지 도전율로 예측된 전계 강도는 측정된 결과와 유사한 값을 가짐을 확인할 수 있다. 그림 1(b)는 전체 측정값으로부터 계산된 에러 함수  $M$ 의 CDF(Cumulative Distribution Function)를 나타낸다. 이때 수정된 유효 대지 도전율을 적용한 에러 함수는 평균이 0 dB에 일치하고 표준편차가 ITU-R 유효 대지 도전율의 결과보다 작게 나타난다. 따라서 수정된 유효 대지 도전율이 ITU-R 유효 대지 도전율보다 국내 환경을 잘 나타냄을 알 수 있다. 최종적으로 수정된 유효 대지 도전율 결과는 그림 2에 나타나 있다.

#### IV. 시스템 커버리지 분석

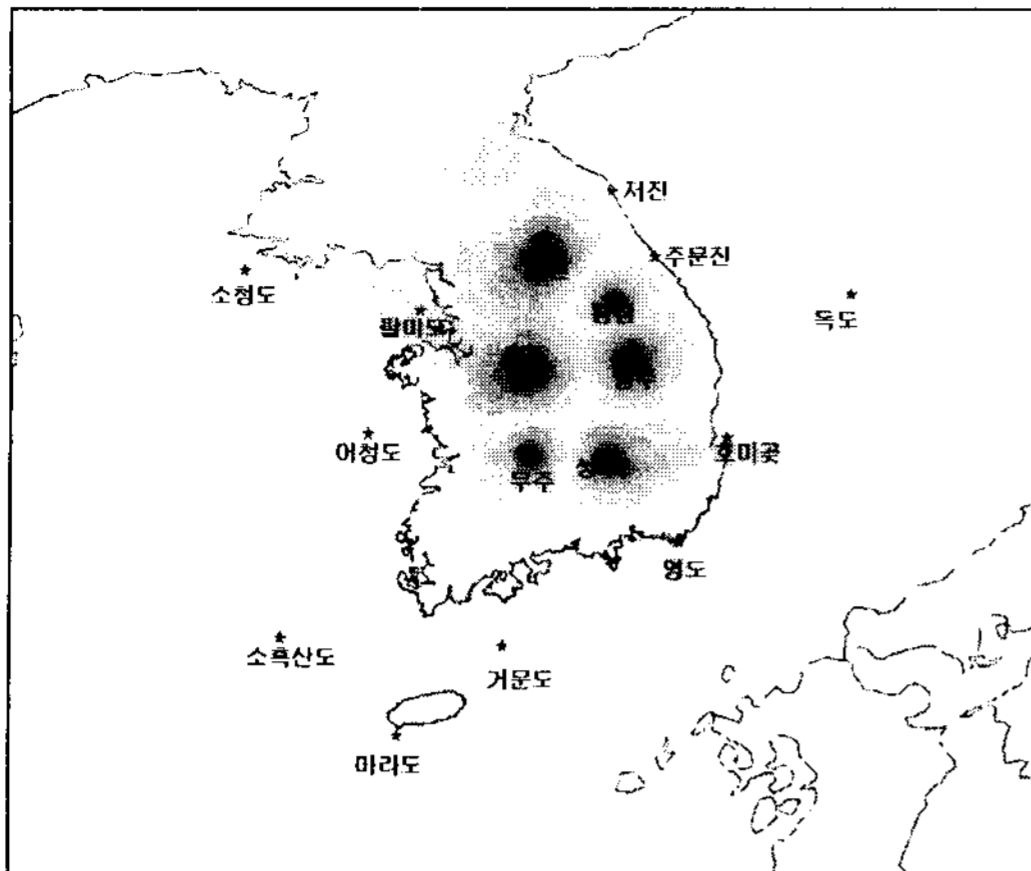
현재 국내에는 해양수산부에서 11개의 해상 기준국과 6개의 육상 기준국이 운용 중에 있다. 이번 절에서는 앞 절에서 구해진 유효 대지 도전율을 이용하여 현재 운용중인 DGPS의 커버리지를 분석하였다. 전계 강도의 예측은 식 (1)의 중파 대역 감쇠 모델과 식 (6)의 혼합 경로 모델을 이용하였으며, 각 기준국의 서비스 범위는 권고하고 있는  $40 \text{ dB } \mu\text{V/m}$ 를 기준으로 하였다. 북한 지역의 경우, 유효 대지 도전율 값을 구할 수 없기 때문에 본 논문에서는 분석을 하지 않았다.

먼저 육상 기준국에 의한 서비스 범위는 그림 3(a)

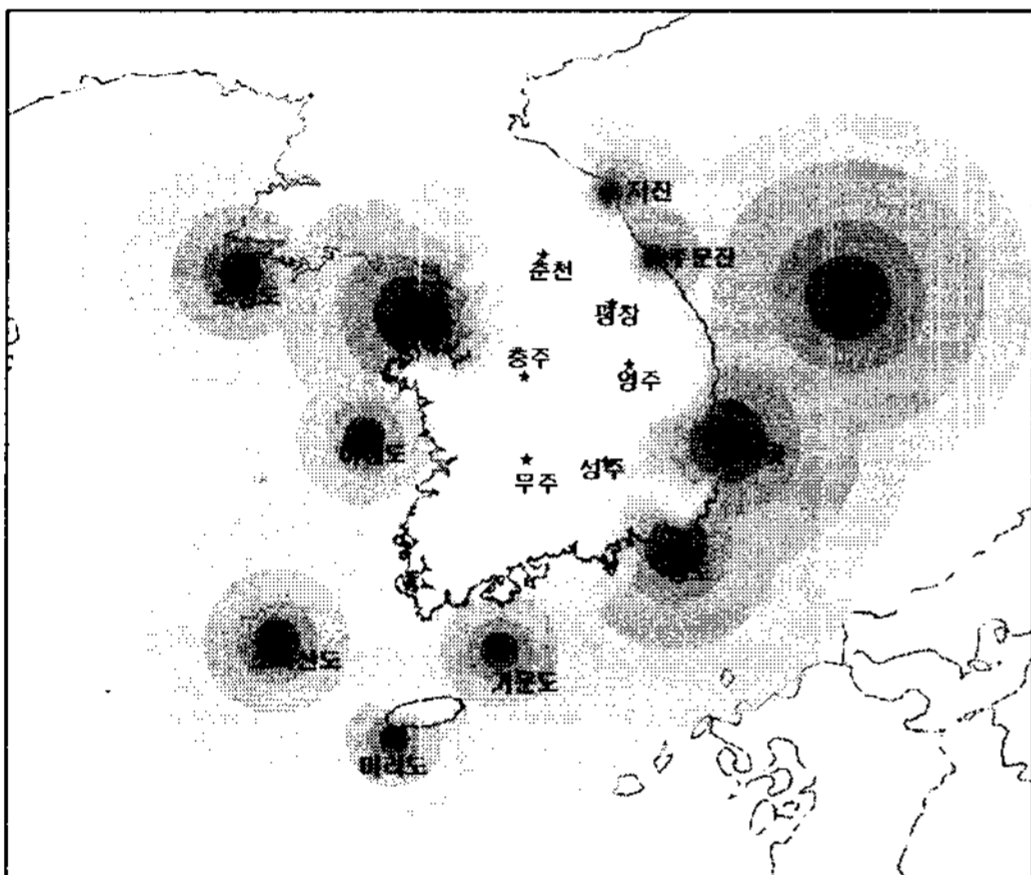
에 나타나 있다. 그림에서 전계 강도의 세기는 그 크기가 셀수록 진한 색으로 표시되며, 약할수록 옅은 색으로 표시된다. 그림에서 육상 기준국은 약 50~70 km 정도의 서비스 범위를 가지며, 평창 기준국의 경우가 가장 작은 서비스 범위를 가짐을 알 수 있다. 이것은 평창 기준국 주변의 유효 대지 도전율이 0.2 mS/m로 가장 낮은 값을 갖기 때문이다. 그림 3(b)에서는 해상 기준국의 서비스 범위를 나타낸다. 우선 바다의 도전율이 육지보다 높고 일정한 값을 갖기 때문에 해상 기준국의 서비스 범위가 육상 기준국의 서비스 범위보다 더 넓은 값을 가짐을 알 수 있다. 또한, 팔미도, 저진, 주문진, 호미곶, 영도와 같이 해안에 위치한 기준국에서는 바다는 물론 육지까지 서비스 범위를 가짐을 확인할 수 있다. 그림 3(c)는 전 기준국에서의 서비스 영역을 나타내었다. 이 결과에서 국내의 대부분의 지역이 DGPS 시스템의 동작 영역에 포함되나, 전라남도 지역에는 서비스 영역에 포함되지 못한다. 이것은 전라남도 지역에 인접한 내륙 기준국 또는 해양 기준국이 위치하지 않기 때문이다. 그러나 서비스 범위를  $30 \text{ dB } \mu\text{V/m}$  기준으로 판단하였을 경우에는 전 지역에서 서비스 영역을 만족하게 된다. 이러한 지역에서도 DGPS 시스템은 동작할 수 있으나, 대신 페이딩 때문에 음영 지역의 비율이 더 많아지며 신호대 잡음비(SNR)가 나빠져 안정적인 시스템의 동작이 어려워지게 된다.

다음으로 기준국이 고장이나 여러 상황에 의해 서비스 되지 않을시 주변의 기준국이 어느 정도 지역을 포함할 수 있는지를 확인하는 이중 커버리지 분석을 수행하였다. 이때 해상에서는 해양 도전율이 일정하고 커버리지 분석이 쉽기 때문에 육지만을 대상으로 분석하였다. 먼저 측정하려는 기준국이 서비스가 되지 않는다고 가정을 하고 인접 기준국에 의한 서비스 영역을 표시한다. 다음으로 인접 기준국으로부터의 전계가 미치지 못하는 부분을 표시한다. 이러한 과정을 육상 기준국 6개 및 해안에 위치한 기준국 5개에서 수행하여 이중 커버리지를 분석하였다.

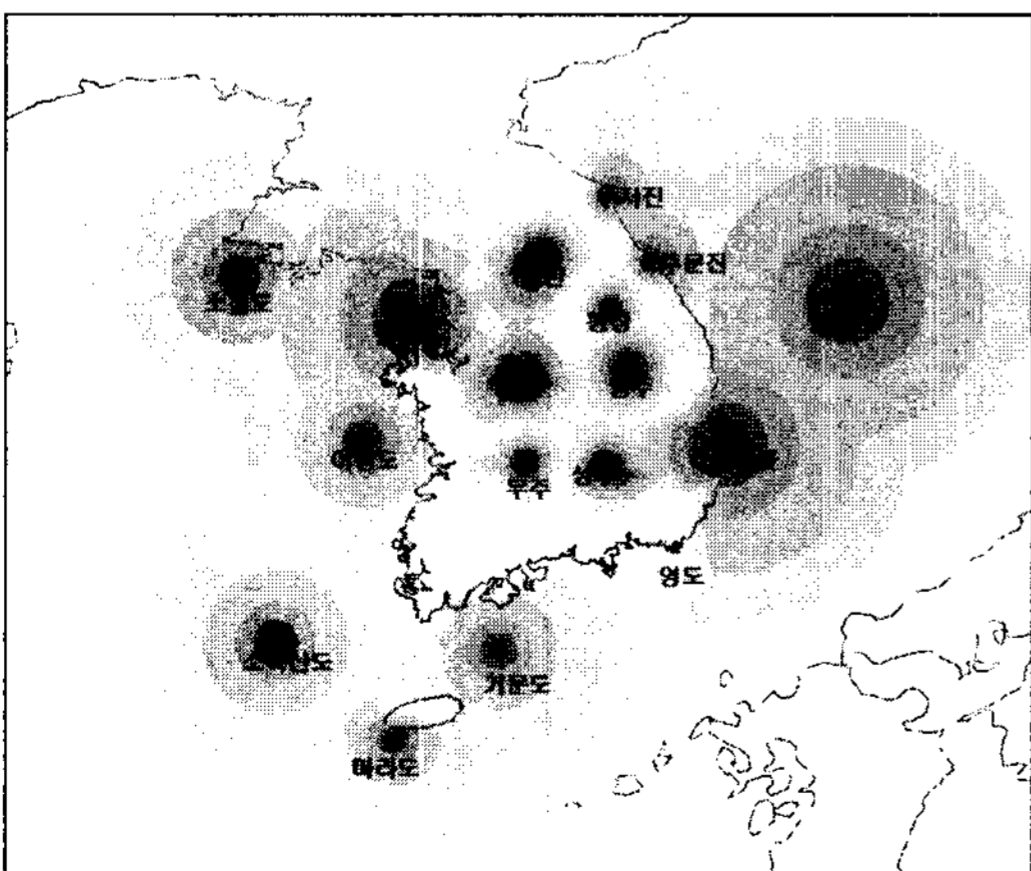
그림 4(a)는 충주 기준국의 분석 과정을 예로 나타낸 것이다. 앞에서 설명한 바와 같이 충주 기준국을 동작시키지 않은 후 나머지 기준국에 의한 서비스 영역만 나타낸다. 다음으로 충주 기준국 주변의



(a) 육상 기준국의 서비스 영역  
(a) System coverage of ground reference stations



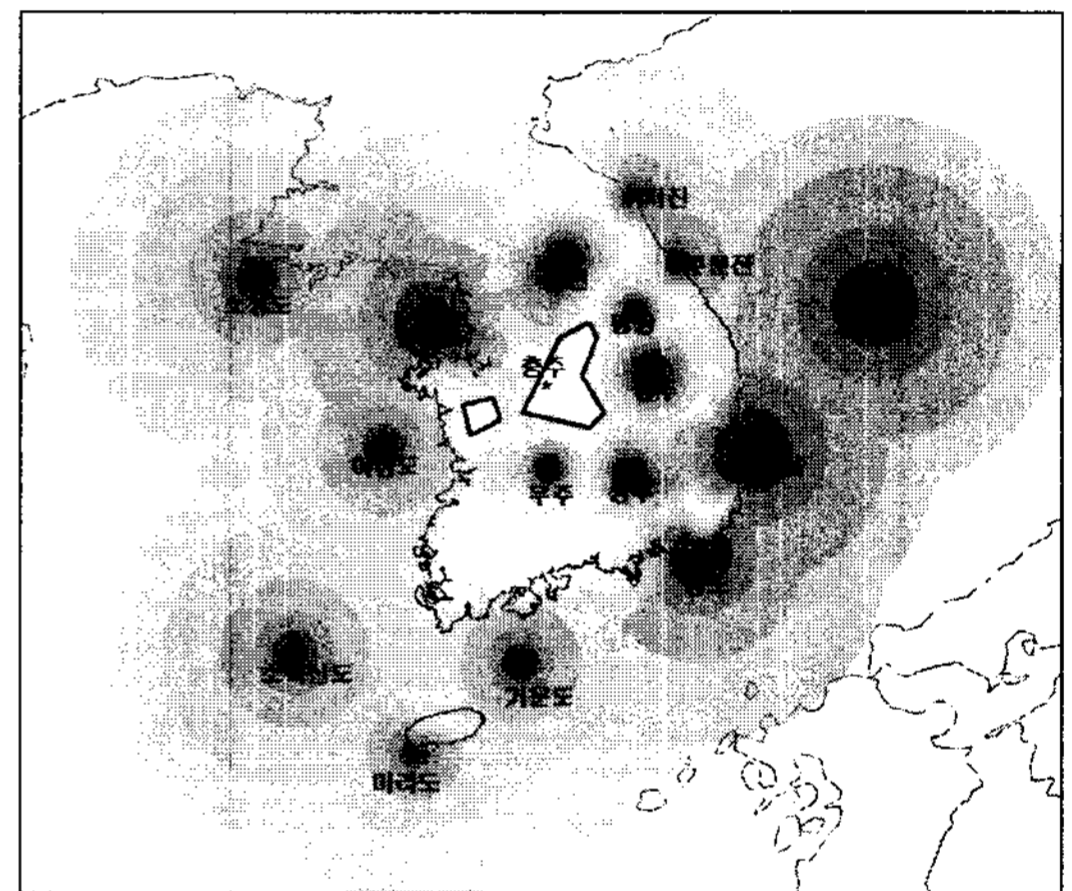
(b) 해상 기준국의 서비스 영역  
(b) System coverage of sea reference stations



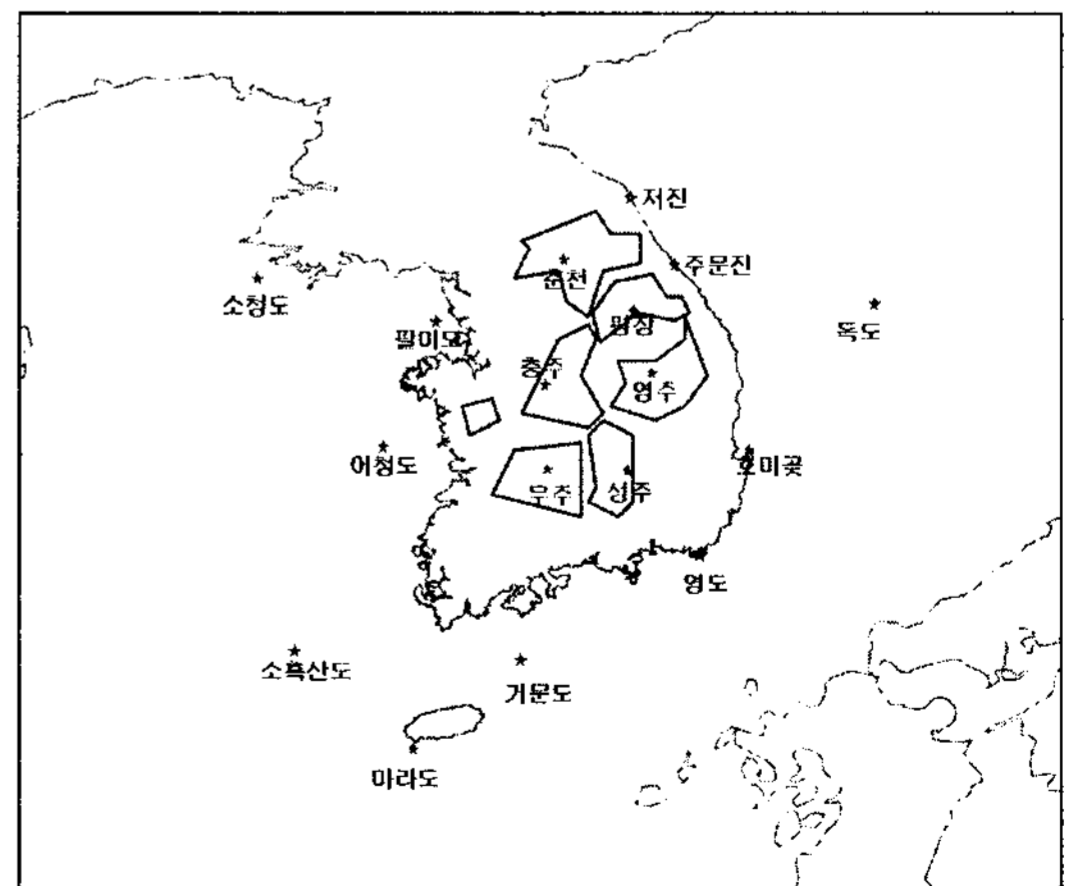
(c) 전 기준국에서의 서비스 영역  
(c) System coverage of all reference stations

그림 3. 서비스 영역 분석  
Fig. 3. Analysis of the system coverage

전계가 미치지 못하는 부분을 표시한다. 이 부분이 이중 커버리지로 동작을 못하는 영역이 된다. 이러한 과정을 나머지 기준국에 모두 수행한 후 결과를 그림 4(b)에 나타냈다. 여기서 표시된 부분은 이중 커버리지를 만족하지 못하는 지역이다. 이러한 지역은 각 내륙 기준국의 중심 부분에 위치하는데, 이것은 내륙에서의 중파 대역의 감쇠가 커서 전계가 멀리까지 전달되지 못하기 때문이다. 반면 해안에 위치한 기준국들은 모두 이중 커버리지를 만족을 한다. 물론 그림 4의 분석에서는  $40 \text{ dB } \mu\text{V/m}$ 를 기준으로 하였으며, 기준을  $30 \text{ dB } \mu\text{V/m}$ 으로 낮출 경우, 전 지역에서 이중 커버리지를 만족하는 결과를 얻었다.



(a) 충주 기준국의 이중 커버리지 분석  
(a) Dual coverage of a Chungju reference station



(b) 전 기준국에서의 이중 커버리지 분석  
(b) Dual coverage of all reference stations

그림 4. 이중 커버리지 분석  
Fig. 4. Analysis of the dual coverage.



그림 5. 추가적인 기준국 위치 및 서비스 영역  
Fig. 5. The location of an additional reference station and its coverage.

이러한 결과는 그림 4(b)에 표시된 부분 이외의 지역에서 기준국이 고장이나 여러 상황에 의해 서비스 되지 않아도 인접 기준국으로 충분히 서비스 가능하다는 것을 의미한다.

마지막으로 전라남도 지역의 안정적인 DGPS 시스템 운용을 위해 새로운 기준국 위치를 그림 5와 같이 제안하였다. 이 지역에 기준국을 추가 설치하게 되면 우리나라 전 국토 95% 서비스 가능하도록 할 수 있음을 그림과 같이 확인할 수 있다.

## V. 결 론

본 연구에서는 DGPS 시스템의 안정적인 운용을 위하여 시스템 커버리지에 대한 분석을 하였다. 이를 위해 통계적인 방법을 이용하여 ITU-R 유효 대지

도전율이 수정되었으며, 이 값을 일반적인 중파 대역 감쇠 모델에 적용하여 전계 강도를 예측하였다. 커버리지 분석 결과에 따르면  $40 \text{ dB } \mu\text{V/m}$ 의 전계 강도를 기준으로 하였을 경우, 국내의 대부분의 지역이 서비스 영역에 포함되었으나, 전라남도 지역의 전계 강도가 기준보다 낮게 나왔다. 이 결과를 토대로 전 국토의 95%가 서비스 영역에 포함할 수 있도록 추가 기준국의 위치를 제안하였다. 그리고 이중 커버리지 분석을 통하여 내륙 기준국 주변의 지역을 제외한 해안 지역에서는 고장 등 만약의 사태에 의해 기준국이 동작하지 못할 경우에도 인접 기준국이 이를 보완할 수 있음을 확인하였다.

## 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*, vol. 40, no. 5, pp. 7-24, 1998.
- [3] A. W. Biggs, "Terrain influences on effective ground conductivity", *IEEE Transaction on Geoscience Electronics*, vol. 8, no. 2, pp. 106-114, Apr. 1970.
- [4] ITU-R Recommendation P.832, "World atlas of ground conductivities", 1992.
- [5] ITU-R Recommendation P.368-7, "Ground-wave propagation curves for frequencies between 10 kHz and 30 MHz", 1992.

## 배 수 원



1983년 2월: 광운대학교 통신공학과 (공학사)  
1995년 6월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)  
1999년 3월~현재: 연세대학교 전자공학과 박사과정  
[주 관심분야] 안테나, 전파전파 등

## 권 세 응



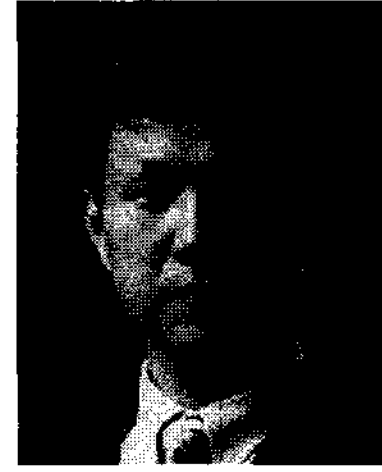
1999년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)  
2002년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)  
2002년 3월~현재: 연세대학교 전자공학과 박사과정  
[주 관심분야] 안테나, 전파전파 등

이 우 성



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

윤 영 중



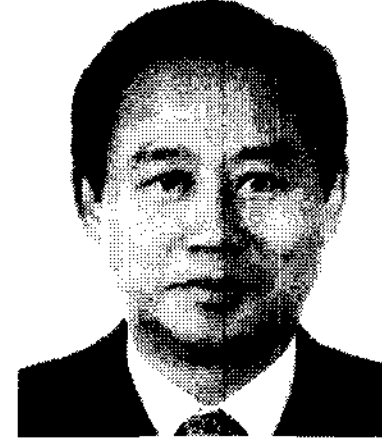
1981년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)  
1986년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)  
1991년 2월: Georgia Institute of Technology (공학박사)  
1992년~1993년: 한국전자통신연구원 위성통신기술연구단  
1993년~현재: 연세대학교 전기전자공학과 교수  
[주 관심분야] 마이크로파 소자, 안테나, 전파전파, EMI/EMC

문 현 욱



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

이 용 안



1977년 2월: 광운대학교 통신공학과 (공학사)  
1999년 2월: 연세대학교 전파공학과 (공학석사)  
2007년 2월: 경기대학교 전자공학과 (공학박사)  
1994년 6월~현재: (주)안세기술 대표이사  
1999년~현재: 향로표지기술협회 이사(현)  
2005년~현재: 한국정보통신기술사회 회장(현)  
2008년~현재: 한국엔지니어링협회 전자정보통신기술협의회 회장(현)  
[주 관심분야] 전파전파, 안테나, 전자파 차폐 등