

환상안테나를 이용한 자기장 세기의 표준에 관한 연구

°박병권, 이창복, 정낙삼  
한국표준연구소

A study on the standard of magnetic field strength using loop antennas

Byeong Kwon Park, Chang Bok Lee, and Nak Sam Chung  
Korea Standards Research Institute

Abstract

A method to determine the near zone magnetic field is presented. Reference magnetic field can be determined by the antenna factor which is defined in terms of the magnetic dipole moment and the incident power to the antenna input port. Two sets of small circular loop antennas have been constructed. The antenna factors of individual set have been measured with 3-antenna method in the frequency range of 10 kHz to 30 MHz.

환상안테나의 고정은 그림 1에서 나타나고 있는 것과 같이 송·수신안테나를 동일축상에 평행하게 위치시켜 수신점에서 송신안테나에서 방사된 표준 자기장의 수신정도를 측정함으로써 이루어진다. 수신안테나에 연결된 전자기장 세기 측정기의 지시치는 수신용 환상안테나에 유기된 전압에 직접 비례하게 되는데, 이는 Faraday's law에 의하여 환상안테나 단면을 자르는 총 자속선의 시간에 대한 변화율에 비례하게 된다. 시간에 따라 정현적으로 변하는 경우를 살펴보면 다음식으로 주어진다.

$$\int \vec{E} \cdot d\vec{l}_2 = -j\omega \int \vec{B} \cdot d\vec{S}_2 \quad (1)$$

1. 서론

일반적으로 자기장 세기의 표준은 standard field method로 10 kHz - 30 MHz 주파수 대역에서 환상안테나를 이용하여 확립하고 있다.[1-3] 이때 송신용 환상안테나에서 떨어진 어느 지점에서의 자기장의 세기는 송신안테나에서의 거리 및 안테나의 구조와 안테나에 흐르는 전류로 표시되는 자기 쌍극자 모멘트를 측정하면 구할 수 있다.[4]

환상안테나에 유기된 전압은 식(1)의 좌변 부분을 나타내는데 이는 환상안테나에 도달하는 전기장의 접선성분을 선적분한 것이고, 우변의 자속밀도( $\vec{B}$ )는 수신안테나 면적  $S_2$ 에 의하여 구속된 임의 점에서 자속밀도를 나타낸다.

본 연구에서는 안테나 입력단에 입사하는 전력의 함수로 송신안테나의 자기 쌍극자 모멘트를 나타낼 수 있도록 안테나 인자를 정의하였으며 이 정의한 안테나 인자를 3-안테나 방법으로[5] 측정하였다. 이때 송신안테나에서 방사되는 자기장의 세기는 안테나 입력단에 입사하는 전력, 안테나 인자와 거리의 함수로 나타내진다.

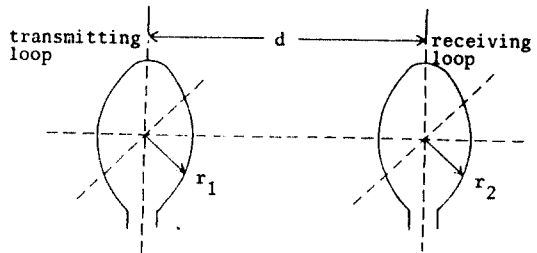


그림 1. 송·수신 안테나의 배열

2. 환상안테나의 고정과 이용

### 3. 환상안테나에서의 자기장

환상안테나의 원거리 특성을 살펴보면 송·수신 안테나 사이의 거리가 이용하려는 주파수에서의 파장보다 매우 큰 경우( $d \gg \lambda$ ) 자기장의 세기 측정시 송·수신 안테나의 반경의 영향을 무시할 수 있다. 그러나 실제 자기장의 세기 측정용 환상안테나의 고정과 이용은 근역장 내( $d < \lambda$ )에서 주로 행하여 지기 때문에 이 경우 송·수신 안테나 반경의 영향을 고려할 필요가 있다.

근역장에서 송·수신 안테나에서 방사되는 자기장의 세기를 구하기 위하여 그림 2와 같이 송·수신안테나를 배치한 경우를 생각해 보자. 수신안테나의 면  $S_2$  상에서 자속밀도  $\vec{B}$ 의 평균값은 retarded vector potential  $\vec{A}$ 의 curl에 의하여 다음과 같이 구해진다.

$$\vec{B}_{av} = \frac{1}{S_2} \iint (\nabla \times \vec{A} \cdot d\vec{S}_2) \quad (2)$$

이때 vector potential  $\vec{A}$ 는 점 P에서 방위각 성분인  $A_\phi$ 만을 갖게 된다. 점 P를  $\phi = 0$ 인 평면 x,y 에 위치하도록 임의로 선택하면  $-\phi$ 와  $+\phi$ 에서 길이  $d\ell_1$ 의 같은 크기를 갖는 성분이 쌍으로 형성된다. 이 성분은 x,y 평면에 평행한  $d\ell_1 \sin \phi$ 와 x,y 평면에 수직인  $d\ell_1 \cos \phi$ 로 나누어 지는데 결과적으로  $d\ell_1 = r d\phi$ 가 되어  $A_\phi$ 를 다음과 같이 쓸 수 있다.[6]

$$A_\phi = \frac{\mu I r_1}{2\pi} \int_0^\pi \frac{e^{-j\beta R}}{R} \cos \phi \, d\phi \quad (3)$$

위 식에서  $R = \sqrt{d^2 + r_1^2 + r_2^2 - 2r_1 r_2 \cos \phi}$ 이다. 그러므로 수신용 환상안테나 평면에서

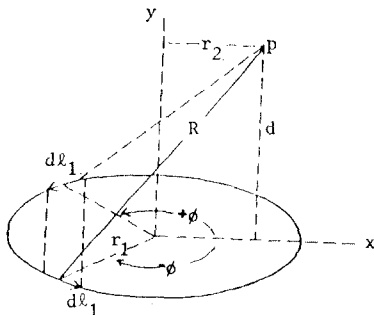


그림 2. 환상 안테나의 자기장을 구하기 위한 기하

자기장 세기의 수직성분의 평균은 다음과 같다.

$$H_{av} = \frac{I r_1}{\pi r_2} \int_0^\pi \frac{e^{-j\beta R}}{R} \cos \phi \, d\phi \quad (4)$$

위 식의 식은 2차의 0계 spherical hankel 함수[7]로부터 구해진다. 이 것의 해를 구하여 급수의 형태로 표시하면 다음과 같다.

$$|H_{av}| = \frac{IS_1}{2\pi R_0^3} \left[ 1 + \frac{15}{8} \left( \frac{r_1 r_2}{R_0} \right)^2 + \frac{315}{64} \left( \frac{r_1 r_2}{R_0} \right)^4 + \dots \right] \cdot (1 + \beta^2 R_0^2)^{3/2} \quad (5)$$

위 식에서  $R_0 = \sqrt{d^2 + r_1^2 + r_2^2}$ 이다.

### 4. 환상안테나의 설계·제작

제작한 환상안테나는 그림 3과 같은 구조를 가지며, 재료는 3.5 mm semirigid cable을 이용하였다. 이 그림에서 C로 표시된 부분은 semirigid cable의 외부도체를 잘라내어 loop winding으로 동작하도록 한 것이다. 이 환상안테나에서 방사되는 자기장의 세기는 semirigid cable 외부도체를 흐르

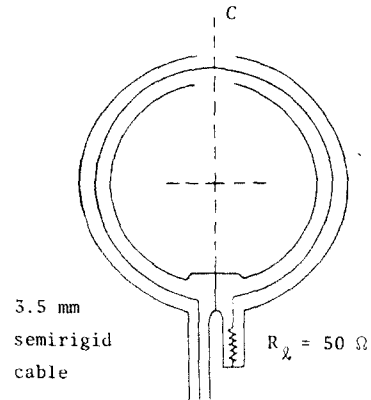


그림 3. 설계한 환상 안테나의 도식

는 전류의 인테나 면적에 의하여 구해진다. 부하 저항을 50 Ω으로 한 것은 환상안테나와 수신기 및 신호원과의 정합특성을 좋도록 하기 위함이다.

이와 같은 특성을 갖는 안테나를 그림 4에서와 같이 2-set를 제작하였으며 각 set는 세개의 안테

나로 구성된다. 안테나 set 1의 경우는 이용하려는 주파수 범위가 10 kHz - 1 MHz로 안테나 반경을 15.0 cm로 하였고, 안테나 set 2의 경우는 이용하려는 주파수 범위가 1 - 30 MHz로 안테나 반경을 6.1 cm로 하여 이용하려는 주파수에서 안테나 상의 전류분포가 일정하도록 하였다.

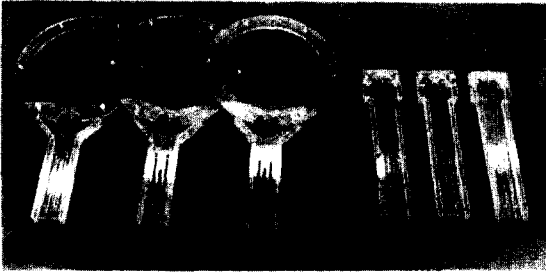


그림 4. 제작한 환상안테나

### 5. 안테나 인자의 측정

#### (1) 안테나 인자의 정의

송신 환상안테나의 단면적이 S이고 안테나상의 전류가 I로 일정할때 환상안테나에서 방사되는 자기장의 세기를 안테나 입력에 입사하는 전력의 함수로 나타내기 위하여 다음과 같이 안테나 인자를 정의한다.

$$F = \frac{m}{2\sqrt{P_1}} \quad (6)$$

위 식에서  $m = IS$  : 자기 쌍극자 모멘트  
 $P_1$  : 안테나 입력단의 입사전력을 나타낸다.

그러므로 송신안테나에서 방사되는 자기장을 나타내는 식(5)는 다음과 같이 안테나 인자(F)와 입사 전력( $P_1$ )의 함수로 표시할 수 있다.

$$|H_{av}| = \frac{F\sqrt{P_1}}{\pi R_o^3} \left[ 1 + \frac{15}{8} \left( \frac{r_1 r_2}{R_o^2} \right) + \frac{315}{64} \left( \frac{r_1 r_2^2}{R_o^2} \right) + \dots \right] \cdot (1 + \beta^2 R_o^2)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

#### (2) 안테나 인자의 이론적 고찰

그림 3과 같은 구조를 갖는 안테나의 등가회로를 그림 5와 같이 나타낼 수 있다. 이때 부하쪽으로 본 임피던스를  $Z_L$  이라 하면 다음식으로 표시된다.<sup>[8]</sup>

$$Z_L = R_{ohmic} + R_r + 50 + j\omega L \quad (8)$$

위 식에서

$$R_{ohmic} = \frac{2r}{d} R_s : \text{ohmic resistance}$$

$$R_s = \sqrt{\frac{\mu_0 2\pi f}{2\sigma}} : \text{surface resistance}$$

$$R_r = 31200 \left( \frac{\pi r^2}{\lambda^2} \right)^2 : \text{radiation resistance}$$

$$L = r\mu_0 \left[ \ln \left( \frac{16r}{d} \right) - 1.75 \right] : \text{loop inductance}$$

$r$  : loop radius,  $d$  : wire diameter

이다.

그러므로 환상안테나상의 전류(I)는 다음식으로 표시된다.

$$I = \left| \frac{1}{Z_o + Z_L} \right| \cdot V_g \quad (9)$$

정합된 신호원에서 부하에 전달되는 전력은  $\frac{V_g^2}{4Z_o}$  이므로 식(6)과 식(9)에 의하여 안테나 인자는 다음식으로 표시된다.

$$F = \left| \frac{Z_o}{Z_o + Z_L} \right| \cdot \frac{S}{\sqrt{Z_o}} \quad (10)$$

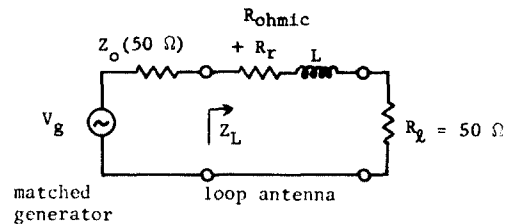


그림 5. 그림 3에 나타나 있는 환상안테나의 등가회로

(3) 안테나 인자의 측정

환상안테나의 가역적인 특성에 의하여 수신 안테나의 출력에 나오는 전력( $P_r$ )은 송·수신안테나가 동일한 경우 송신안테나의 인자( $F$ )로 다음과 같이 구해진다.

$$P_r = (\omega\mu_0 F H_{av})^2 \quad (11)$$

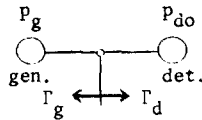
3-안테나 방법으로 안테나 인자를 구하기 위하여 그림 6을 살펴보기로 하자. 그림 6의 (a)에서 수신기에 감지되는 전력( $P_{do}$ )는 다음식과 같다.

$$P_{do} = \frac{1 - |\Gamma_d|^2}{|1 - \Gamma_g \Gamma_d|^2} P_g \quad (12)$$

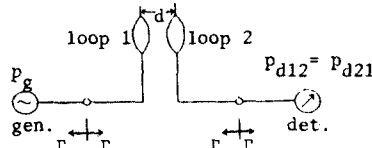
위 식에서  $\Gamma_d$  : 감지기의 반사계수  
 $\Gamma_g$  : 신호원의 반사계수

이다.

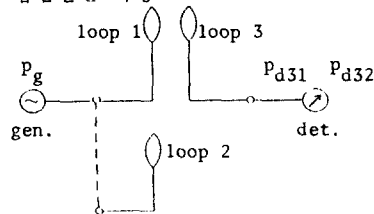
안테나 1과 안테나 2사이의 삽입손실을 구하기 위하여 안테나 1을 송신안테나로 쓰고 안테나 2를 수신안테나로 이용한 그림 6의 (b)를 살펴보자.



(a) 신호원의 출력전력 측정



(b) 삽입손실 측정



(c) 안테나 1과 안테나 2의 비교

그림 6. 환상 안테나 인자의 측정과정

이때 두 안테나가 자기장에 평행하다고 하면 식(6), 식(11), 식(12)와 회로해석에 의하여 감지기에 감지되는 전력은 다음과 같다.

$$P_{d21} = \left| \frac{2\omega\mu_0 F_1 F_2 R(d) (1 - \Gamma_d \Gamma_g)}{(1 - \Gamma_1 \Gamma_g)(1 - \Gamma_2 \Gamma_d)} \right|^2 P_{do} \quad (13)$$

위 식에서  $F_1$  : 안테나 1의 안테나 인자  
 $F_2$  : 안테나 2의 안테나 인자  
 $\Gamma_1$  : 안테나 1의 반사계수  
 $\Gamma_2$  : 안테나 2의 반사계수

$$R(d) = \frac{1}{2\pi R_0^3} \left[ 1 + \frac{15}{8} \left( \frac{\Gamma_1 \Gamma_2}{R_0} \right)^2 + \frac{315}{64} \left( \frac{\Gamma_1 \Gamma_2}{R_0} \right)^4 + \dots \right] \cdot (1 + \beta^2 R_0^2)^{\frac{1}{2}}$$

마찬가지로 그림 6의 (c)에서  $P_{d31}$ 과  $P_{d32}$ 는 다음식으로 표시된다.

$$P_{d31} = \left| \frac{2\omega\mu_0 R(d) (1 - \Gamma_d \Gamma_g) F_1 F_3}{(1 - \Gamma_g \Gamma_1)(1 - \Gamma_d \Gamma_3)} \right|^2 P_{do} \quad (14)$$

$$P_{d32} = \left| \frac{2\omega\mu_0 R(d) (1 - \Gamma_d \Gamma_g) F_2 F_3}{(1 - \Gamma_g \Gamma_2)(1 - \Gamma_d \Gamma_3)} \right|^2 P_{do} \quad (15)$$

위 식에서  $\Gamma_3$ 는 안테나 3의 반사계수이다. 위의 식(13), 식(14)와 식(15)를  $F_1$ 과  $F_2$ 에 대하여 연립하여 풀면 다음의 관계식을 얻는다.

$$F_1 = \left[ \frac{1}{2\omega\mu_0 R(d)} \left( \frac{P_{d21}}{P_{do}} \cdot \frac{P_{d31}}{P_{d32}} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{(1 - \Gamma_g \Gamma_1)^2 (1 - \Gamma_d \Gamma_2)}{(1 - \Gamma_g \Gamma_2)(1 - \Gamma_g \Gamma_d)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (16)$$

$$F_2 = \left[ \frac{1}{2\omega\mu_0 R(d)} \left( \frac{P_{d21}}{P_{do}} \cdot \frac{P_{d32}}{P_{d31}} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{(1 - \Gamma_g \Gamma_1)(1 - \Gamma_d \Gamma_2)}{(1 - \Gamma_g \Gamma_d)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (17)$$

식(16)과 식(17)에 나타나 있듯이 환상안테나 인자는 전력측정의비, 주파수, 반사계수 및 송·수신 안테나 사이의 거리 측정으로 구할 수 있다.

6. 측정결과 및 고찰

3-안테나 방법으로 측정한 각 안테나 set의 안테나 1과 안테나 2의 안테나 인자  $F_1$  과  $F_2$ 를 그림 7과 그림 8에 각각 식(10)의 이론치와 비교하여 나타내었다.

각 그림에서 안테나 set 1을 구성하는 안테나 1의 안테나 인자 측정치는 49.99 - 49.79이고, 안테나 2의 안테나 인자는 49.99 - 49.78이다. 또한 안테나 set 2의 경우 안테나 1의 안테나 인자 측정치 7.836 - 7.399이고, 안테나 2의 안테나 인자는 8.36 - 7.44이다. 각 안테나 인자 측정치의 측정 편차는 약 0.1정도 이었고, 안테나 인자의 이론치와 측정치의 차이는 안테나 임피던스의 측정치와 이론치의 차에 주로 기인 한다.

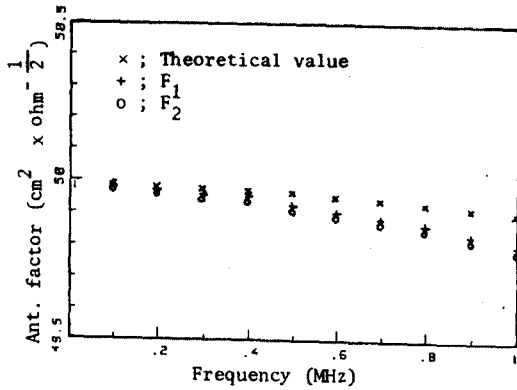


그림 7. 안테나 set #1 의 안테나 인자

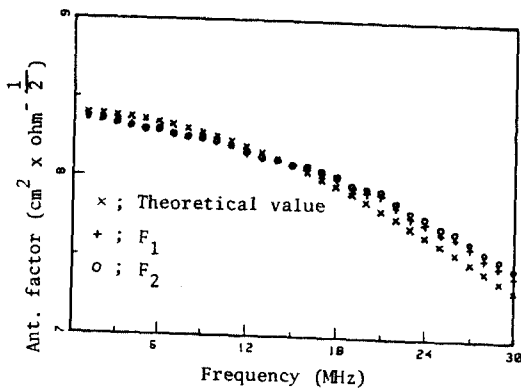


그림 8. 안테나 set #2 의 안테나 인자

7. 결 론

환상안테나에서 방사되는 자기장의 세기를 구할 수 있도록 안테나 인자의 측정방법을 제시하였으며 이 방법은 각종 환상안테나의 특성측정에 이용할 수 있다.

제작한 환상안테나 set의 안테나 인자를 측정한 결과로서 10 kHz - 30 MHz 대역에서 자기장의 세기 표준을 확립하였으며, 이 결과를 이용하여 각종 전자기장의 세기 측정기 및 환상안테나를 고정할 수 있게 되었다.

\* 참고 문헌

- (1) A.G. Jean, H.E. Taggart, and J.R. Wait, "Calibration of loop antennas at VLF," J. Res. Nat. Bur. Stand. Vol. 65, No. 3 pp. 189 - 193, July - Sept., 1961.
- (2) H.H. Beverage, S.A. Bowhill and H. Fine, "IEEE standards report on measuring field strength in radio wave propagation," No. 291, pp. 1 - 24, May, 1969.
- (3) F.M. Green, "The near zone magnetic field of a small circular loop antenna," J. Res. Nat. Bur. Stand. Vol. 71C, pp. 319-326, Oct. - Dec., 1967.
- (4) C.A. Balanis, Antenna theory analysis and design, pp. 169, Harper & Row publishers, N.Y., 1982.
- (5) IEEE standard test procedures for antennas, IEEE Std. 149 - 1979, Published by IEEE Inc., 1979.
- (6) W.R. Symthe, Static and dynamic electricity, pp. 270 - 271, McGraw-Hill, New York, 1950.
- (7) R.F. Harrington, Time-harmonic electromagnetic field, pp. 264 - 269 and pp. 460 - 464, McGraw Hill, New York, 1961.
- (8) W.L. Stutzman and G.A. Thiele, Antenna theory and design, pp. 101 - 104, John wiley & Sons Inc. 1981.