

전기적 소형다이폴 안테나의 강제 공진특성 해석과 주파수 측정에의 응용 가능성 연구

Analysis of Forced Resonance Characteristics of Electrically Small Dipole Antennas and Its Application to Measurements of Unknown Frequency

김 기 채

Ki-Chai Kim

요 약

본 논문에서는 리액턴스 소자를 갖는 전기적 소형다이폴 안테나의 강제 공진특성을 해석하고 있다. 이론 해석에는 다이폴 안테나에 흐르는 전류분포에 관한 적분방정식을 풀기 위해 모멘트 법을 적용했으며, 강제 공진특성을 검토하기 위하여 급전점 및 장하점에 착목한 2단자 등가 회로망으로부터 안테나가 강제적으로 공진하도록 하는 리액턴스의 값을 결정하는 결정방정식을 도출하고 있다. 공진특성의 해석결과 리액턴스 소자를 적절히 조절하면 안테나가 강제적으로 공진하며, 강제 공진에는 직렬공진 및 병렬공진의 두 가지 종류가 존재한다는 것을 밝히고 있다. 또한, 이들 강제 공진특성을 미지 주파수의 측정에 이용할 수 있다는 것을 원리적인 면을 중심으로 이론적으로 검토하고 있다.

Abstract

This paper presents the analysis of forced resonance characteristics of electrically small dipole antenna loaded with external element and its application to measuring unknown frequencies. The method of moments with Galerkin's procedure is used to determine the current distribution of the antenna. To derive the determinantal equation of resonance lengths at a given frequency, small antennas with the reactance loaded can be treated as a two-port network. Numerical results show that the forced resonance of the electrically small dipole antenna loaded with reactance can be easily obtained by controlling the reactance for the series resonance as well as for the parallel resonance. It is demonstrated that the forced resonance characteristics can also be applied to the measurement of unknown frequencies.

I. 서 론

안테나 소자에 임피던스 소자를 장하하여 방사

지향성 또는 입력 임피던스 등을 제어하는 방법은 일반적으로 잘 알려져 있다^{[1]-[3]}. 일 예로 가장 기본적인 안테나 소자의 하나인 다이폴 안테나의 방사지향성을 제어하기 위해서는 전류분포의 제어가

영남대학교 전기전자공학부(Dept. of Electrical & Electronic Eng., Yeungnam University)

· 논문 번호 : 970227-013

· 수정완료일자 : 1997년 4월 28일

비교적 용이한 반파장 이상의 길이를 사용하는 것이 바람직한 것으로 알려져 있다. 이 때문에 방사 지향성의 제어에 관해서는 반파장보다 짧은 전기적 소형 안테나는 그다지 검토되어 있지 않으나, 일반적인 전기적 소형다이폴 안테나에 부하소자를 장하하여 고이득을 얻든가 또는 임피던스를 제어하는 방법 등에 관해서는 많은 검토가 이루어져 있다.^{4)~16)}

본 논문에서는 전기적 소형다이폴 안테나에 제어 소자(리액턴스 소자)를 접속하여 소형다이폴 안테나가 강제적으로 공진하는 강제 공진특성을 모멘트 법으로 해석하였으며, 이러한 강제 공진특성을 주파수의 측정에 이용할 수 있다는 것을 검토하고 있다. 이론 해석에는 안테나에 흐르는 전류분포에 관한 적분방정식을 구분적 정현함수를 사용한 Galerkin의 모멘트 법으로 해석하고, 제어소자는 평행 2선으로 구성된 리액턴스를 이용했다. 그리고, 안테나가 강제적으로 공진하도록 하는 리액턴스의 결정 방정식을 2단자 등가 회로망으로부터 유도하여 소형다이폴 안테나의 강제 공진특성을 검토했다.

그 결과, 안테나가 공진하는 리액턴스의 값은 두 가지 존재하며 각각 직렬공진 및 병렬공진을 주는 값이라는 것을 알았다. 이들 두 가지의 공진 중에서 큰 입력 임피던스를 갖는 병렬공진을 이용하면 안테나에 미치는 주위환경의 영향을 작게 할 수 있으므로 응용목적에 따라서는 이 특성을 유용하게 이용할 수 있다.

강제 공진특성을 이용한 응용 분야로서는 미지 주파수의 측정 또는 건물과 같이 비교적 규모가 큰 고정된 시료의 재료정수 측정을 생각할 수 있으며, 본 논문에서는 하나의 응용 예로서 안테나의 강제 공진특성을 미지주파수의 측정에 이용하는 방법에 관하여 검토하고 있다. 강제 공진특성을 이용한 주파수 측정의 원리는 안테나의 전류분포를 제어하기 위한 리액턴스 소자를 적극적으로 이용하는 데에 있다. 즉, 안테나가 어떤 주파수에 강제적으로 공진하도록 안테나에 접속한 리액턴스 소자의 값을 제어하면 그 때의 리액턴스의 값으로부터 미지의 주

파수를 결정할 수 있다.

본 논문에서는 강제 공진특성의 해석 및 이의 응용 가능성의 탐색에 주안을 두고 있으므로 강제 공진특성 해석의 이론적인 부분을 중점적으로 취급하기로 하고, 미지 주파수의 측정에 관한 실험 및 응용 예는 별도의 논문에서 다루고자 한다.

II. 이론 해석

2-1 적분방정식

그림 1은 리액턴스 소자가 접속된 전기적 소형다이폴 안테나의 구조와 좌표계를 나타낸다. 반경 a , 길이 $2l$ 인 다이폴 안테나가 z 축 방향으로 놓여져 있고, 중심에서 c 위치에 리액터스 소자(jX)가 접속되어 있다. 또한, 중심에서 s 위치에 전압 V 가 급전되고 있다.

안테나의 반경은 파장에 비교하여 충분히 작다고 가정하고 델타함수적 전원으로 급전한다. 또한 리액턴스의 접속점에서도 델타함수적 전압을 가정하면 안테나에 유기되어 흐르는 전류분포 $I(z')$ 에 관한 적분방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{1}{j\omega\epsilon_0} \int \left[\frac{\partial^2}{\partial z'^2} + k_0^2 \right] G(z, z') I(z') dz' = -V\delta(z+s) + jXI(c)\delta(z-c) \quad (1)$$

여기서, ω 및 ϵ_0 는 각각 각주파수 및 진공의 유전율, $k_0 = \omega\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$, $I(c)$ 는 장하점에서의 전류치이며 자유공간의 그린함수 G 는

$$G(z, z') = \frac{e^{-jk_0R(z, z')}}{4\pi R(z, z')} \quad (2)$$

$$R = \sqrt{(z-z')^2 + a^2} \quad (3)$$

이다.

적분방정식 (1)은 구분적 정현함수를 이용한 Galerkin의 모멘트 법¹⁷⁾으로 해석하며 구체적인 정

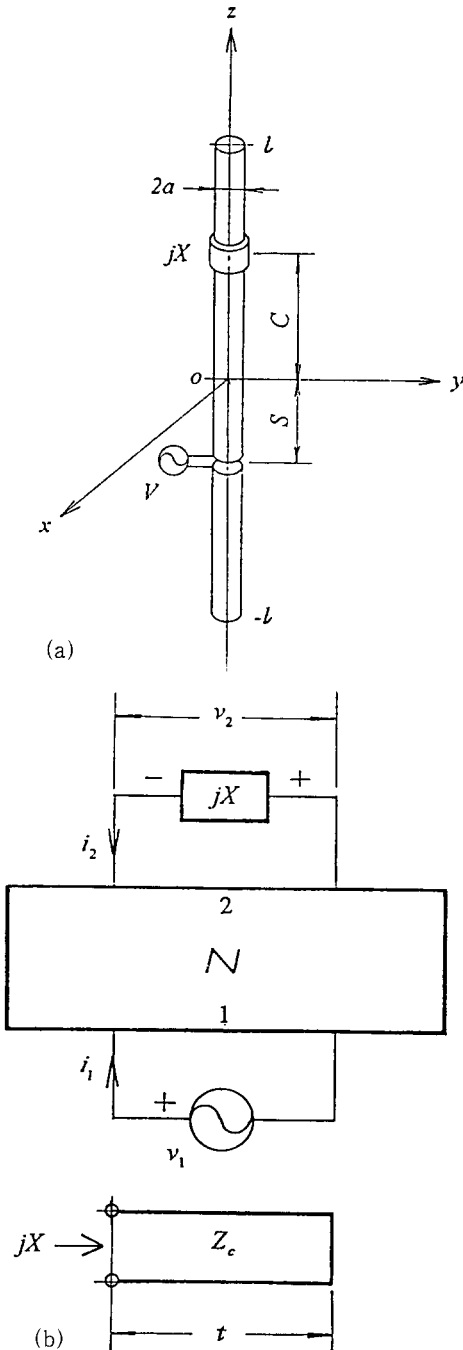


그림 1. 전기적 소형다이폴 안테나와 등가회로
 Fig. 1. Electrically small dipole antenna and its equivalent circuit.

식화 과정은 잘 알려져 있으므로 생략하도록 한다.

2-2 공진조건과 강제 공진특성

그림 1(a)의 안테나에서 급전점에서의 공진조건은 다음 식으로 주어진다.

$$\text{Im}\{Z_{in}(f, jX)\} = 0 \tag{4}$$

여기서, Z_{in} 은 안테나의 입력 임피던스이며, f 는 주파수, Im 은 복소수의 허수부를 나타내고 X 는 장하 리액턴스의 값이다. 공진 조건식 (4)를 만족하는 리액턴스의 값을 구하면 주파수 f 와 공진시의 리액턴스 값 X 의 관계가 얻어진다.

식 (4)를 풀기 위해서는 먼저 안테나의 입력 임피던스를 계산해야 한다. 그림 1(a)에서 급전점과 장하점에 주목하면, 그림 1(a)의 안테나는 그림 1(b)와 같은 2단자 회로망으로 취급할 수 있으며, 어드미턴스 파라미터 $y_{ij}(i, j=1, 2)$ 를 이용하여 다음과 같은 포트의 전류(i_1, i_2), 전압(v_1, v_2)의 관계식을 얻을 수 있다.

$$\begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \end{pmatrix} \tag{5}$$

여기서, 첨자 1은 급전점을 나타내며 첨자2는 리액턴스의 접속점(장하점)을 나타낸다.

장하점에 접속되어 있는 리액턴스 소자를 고려하면 장하점 전류치는

$$i_2 = -jX^{-1}v_2 \tag{6}$$

이므로, 식 (6)을 식 (5)에 대입하면 안테나의 입력 임피던스는 다음과 같이 표현된다.

$$Z_{in} = \frac{y_{22} + (jX)^{-1}}{y_{11}\{y_{22} + (jX)^{-1}\} - y_{12}^2} \tag{7}$$

식 (7)에서 복소량인 어드미턴스 파라미터 y_{ij} 를 실수부와 허수부로 나누어 각각을 y_{ij}^R 과 y_{ij}^I 로 나타내고, 식 (7)을 공진조건식 (4)에 대입하여 정리하면 다음의 식을 얻는다.

$$X^{-2}y_{11}^I + X^{-1}E + F = 0 \quad (8)$$

여기서, E 와 F 는 어드미턴스 파라미터의 함수로써 사용주파수와 안테나의 구조가 주어지면 계산되며 구체적인 표현식은 다음과 같다.

$$E = (y_{12}^I)^2 - 2y_{21}^I y_{11}^I - (y_{12}^R)^2 \quad (9)$$

$$F = y_{11}^I (y_{22}^R)^2 + y_{11}^I (y_{22}^I)^2 - 2y_{22}^R y_{12}^R y_{12}^I - y_{11}^I (y_{12}^I)^2 + y_{22}^I (y_{12}^R)^2 \quad (10)$$

식 (8)로부터 리액턴스의 값 X 는 2종류가 존재한다는 것을 알 수 있으며 그 해는 다음과 같다.

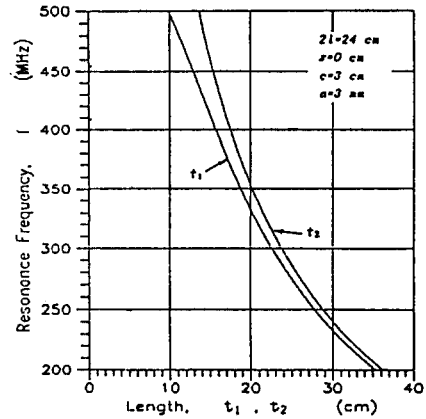
$$X^{-1} = \frac{-E \pm \sqrt{E^2 - 4y_{11}^I F}}{2y_{11}^I} \quad (11)$$

길이가 t 인 끝단 단락의 평행 2선으로 구성된 선로를 리액턴스 소자로 이용하면 리액턴스는 $jX = jZ_c \tan(k_0 t)$ 로 주어진다. 단, Z_c 는 선로의 특성 임피던스이다. 이 X 를 식 (11)의 좌변에 대입하면 리액턴스의 길이 t (t_1 or t_2)에 관한 다음의 식을 얻을 수 있다.

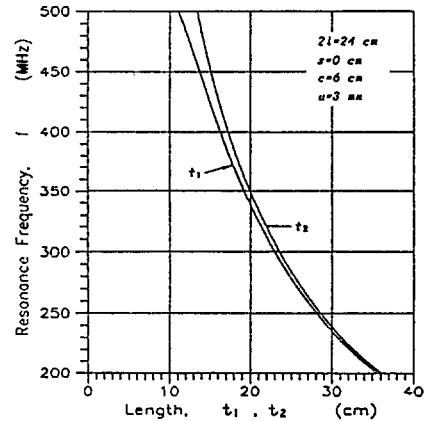
$$k_0 t_1 = \tan^{-1} \left(\frac{2y_{11}^I}{Z_c [-E + \sqrt{E^2 - 4y_{11}^I F}]} \right) \quad (12)$$

$$k_0 t_2 = \tan^{-1} \left(\frac{2y_{11}^I}{Z_c [-E - \sqrt{E^2 - 4y_{11}^I F}]} \right) \quad (13)$$

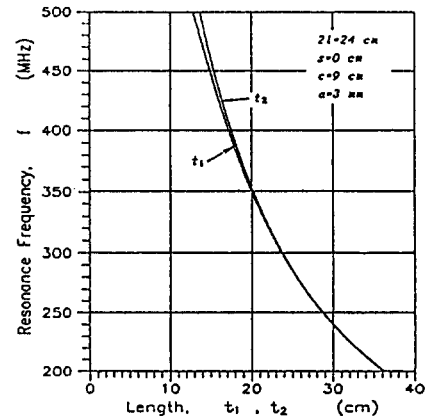
위의 식은 사용 주파수가 주어졌을 때 강제 공진을 일으키게 하는 리액턴스 소자의 길이를 결정하기 위한 결정 방정식이고, 다음 장에서 논의하는 수



(a) $C = 3$ cm



(b) $C = 6$ cm



(c) $C = 9$ cm

그림 2. 리액턴스 길이와 강제 공진주파수의 관계
Fig. 2. Relationship between the length of reactance and the resonance frequency.

치해석의 결과, 식 (12)는 직렬공진에 해당하며 식 (13)은 병렬공진에 대응한다.

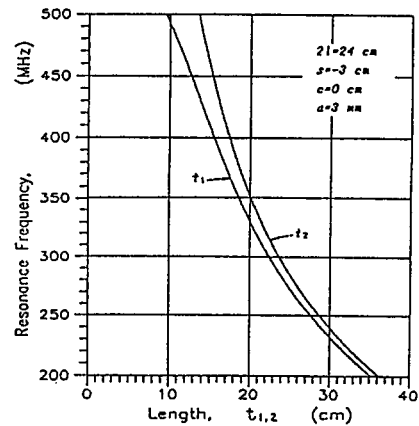
III. 수치계산 결과 및 검토

그림 2는 급전점의 위치 S 를 고정하고 장하점의 위치 C 를 변화시켰을 때, 안테나가 강제적으로 공진할 때의 리액턴스 길이와 공진 주파수의 관계를 식 (12) 및 식 (13)으로부터 계산한 결과를 나타낸다. 그림 2로부터 알 수 있는 것처럼 장하점의 위치가 급전점으로부터 멀어질수록 직렬공진 및 병렬공진을 주는 리액턴스의 길이가 서로 가까워지며 낮은 주파수 대역에서는 두 길이의 구별이 어려워진다.

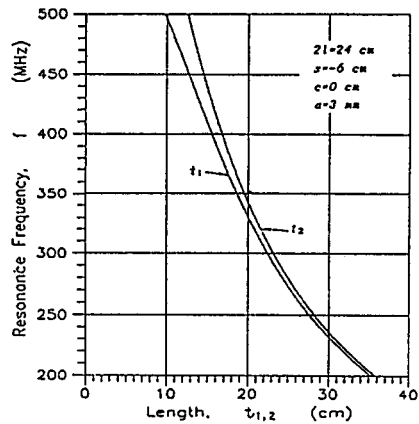
그림 3은 장하점의 위치 C 를 고정하고 급전점의 위치 S 를 변화시켰을 때, 안테나가 강제적으로 공진할 때의 리액턴스 길이와 공진 주파수의 관계를 나타낸다. 그림 3으로부터 알 수 있는 것처럼 장하점의 위치와 급전점의 위치가 서로 멀어지면 그림 2의 결과와 마찬가지로 직렬공진 및 병렬공진을 일으키는 리액턴스의 길이가 서로 가까워지며, 그림 3(a)는 그림 2(a)와 거의 동일함을 확인할 수 있다. 장하점과 급전점의 위치가 서로 멀어질수록 그림 2(b), (c)와 그림 3(b), (c)에서 알 수 있는 것처럼 공진 길이는 현저하게 차이가 난다.

일 예로서, 그림 2(a)로부터 주파수 300 MHz를 선택하면 이 주파수에 공진하는 리액턴스의 길이는 각각 $t_1=22.585$ cm 및 $t_2=23.771$ cm인데, 이들 리액턴스의 길이를 고정했을 때 입력 임피던스의 주파수 특성을 식 (7)을 사용하여 계산하면 그림 4와 같다. 그림 4로부터 알 수 있는 것처럼 리액턴스의 길이가 $t_1=22.585$ cm에서는 주파수 300 MHz에서 직렬공진이 되고(그림 4(a)), $t_2=23.771$ cm에서는 같은 주파수 300 MHz에서 병렬공진이 된다(그림 4(b)). 즉, 식 (12)는 직렬공진에 대응하고 식 (13)은 병렬공진에 대응한다는 것을 알 수 있다.

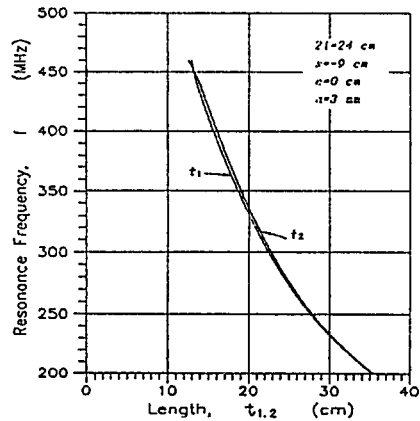
따라서, 강제 공진특성의 응용 예로서 미지 주파수의 측정을 생각했을 때, 강제공진을 일으키게 하는 길이로서 t_1 를 측정할 경우에는 식 (12)를, t_2 를 측정



(a) $S = -3$ cm



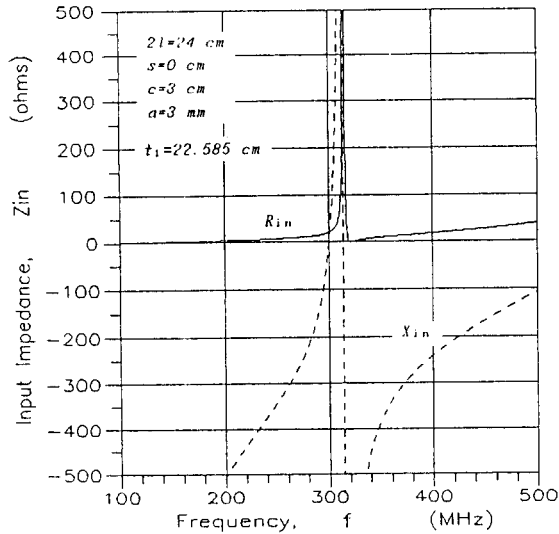
(b) $S = -6$ cm



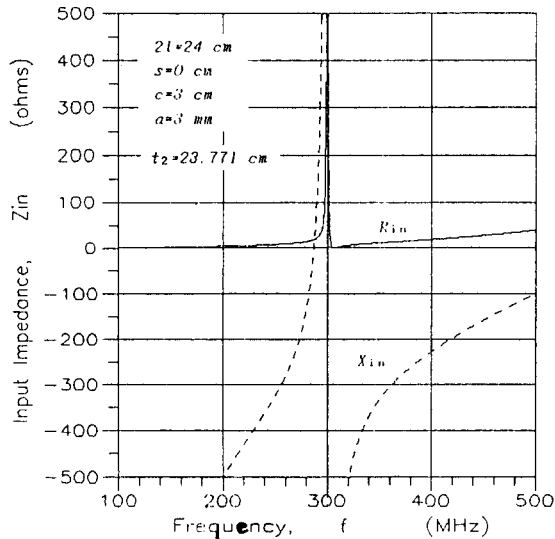
(c) $S = -9$ cm

그림 3. 리액턴스 길이와 강제 공진주파수의 관계

Fig. 3. Relationship between the length of reactance and the resonance frequency.



(a) $t_1 = 22.585$ cm



(b) $t_2 = 23.771$ cm

그림 4. 입력 임피던스의 주파수 특성

Fig. 4. Frequency characteristics of the input impedance.

한 경우에는 식 (13)을 이용하여 미지의 주파수를 결정할 수 있다. 여기서, t_1 과 t_2 중에서 어느 쪽을 측정했는지는 급전점에 흐르는 전류의 최대치 또는

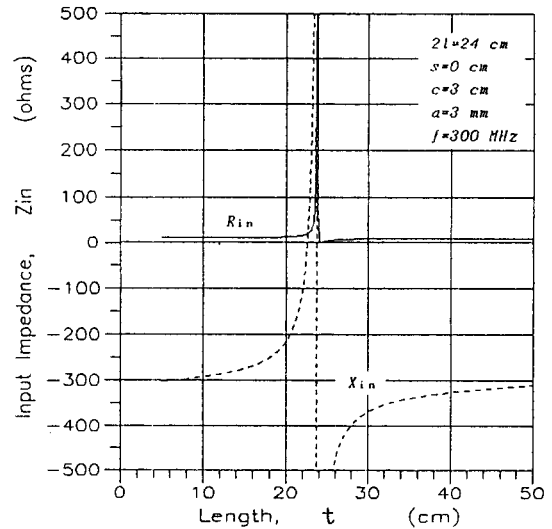


그림 5. 입력 임피던스와 리액턴스 길이의 관계

Fig. 5. Relationship between the input impedance and the length of reactance.

최소치로부터 판별할 수 있다(그림 6).

그림 5는 주파수를 300 MHz에 고정했을 때, 리액턴스의 길이에 대한 입력 임피던스 특성을 식 (7)로부터 계산한 일 예를 나타낸다. 그림 4에서 확인된 것처럼 그림 5에서도 동일한 공진특성을 확인할 수 있다. 즉 리액턴스의 길이가 $t = 22.585$ cm에서 입력 리액턴스가 용량성에서 유도성으로 바뀌는 직렬공진이 일어나고, $t = 23.771$ cm에서 병렬공진이 일어난다는 것을 알 수 있다.

이와 같은 사실은 적분방정식 (1)의 해 $I(z)$ 를 구하여 급전점 전류치를 관찰해 보면 쉽게 이해할 수 있는데, 그림 6은 주파수를 300 MHz에 고정했을 때, 급전점 전류치의 진폭과 위상의 변화를 리액턴스의 길이에 대하여 계산한 일 예를 나타낸 것이다. 그림 6에서 급전점 전류치의 진폭이 최대가 되는 리액턴스의 길이는 $t = 22.585$ cm이며, 진폭이 최소가 되는 리액턴스의 길이는 $t = 23.771$ cm이라는 것을 알 수 있다. 즉, 그림 5와 관련시켜 고찰해보면, 그림 6에서 급전점 전류치의 진폭이 최소가

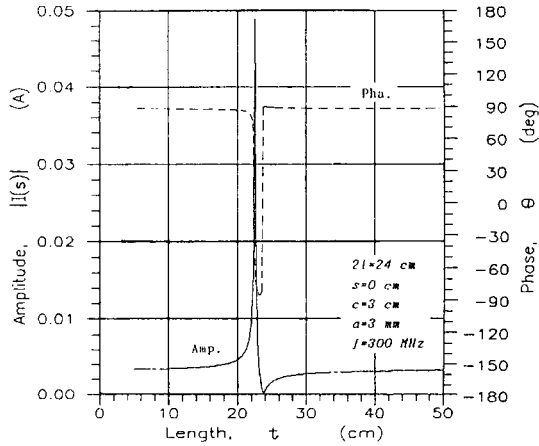


그림 6. 리액턴스 길이와 급전점 전류치의 관계

Fig. 6. Relationship between the length of reactance and driving point currents.

되는 곳에서 입력 저항이 최대가 되어 반공진에 해당한다는 것을 알 수 있다. 따라서 그림 6의 급전점 전류치의 결과로부터 공진의 종류를 식별할 수 있다는 것을 알 수 있다.

그림 6의 결과를 이용하면 공진의 종류를 간편하게 구분할 수 있으므로 미지주파수의 측정에 이용할 수 있다. 즉, 미지주파수의 측정장치 개념도를 나타내는 그림 7에서 리액턴스의 길이를 조절하여 직류전압계가 최대치를 지시하면 직렬공진에 해당하며, 최소치를 지시하면 병렬공진에 해당한다. 이에 대해서는 다음 장에서 언급하도록 한다.

IV. 미지주파수 측정에서의 응용

그림 2(그림 3)에서 알 수 있는 것처럼 공진 길이가 주어지면 공진 주파수를 알 수 있는데, 이러한 관계를 이용하면 공진길이의 측정치로부터 미지의 주파수를 결정할 수 있다. 그림 1에 나타낸 리액턴스 장하 전기적 소형다이폴 안테나의 강제 공진특성을 이용한 미지주파수의 측정원리는 다음과 같다.

그림 7은 미지주파수의 측정에 사용하기 위한 안테나 장치의 개념도를 나타내고 있다. 그림 1의 안테나를 그림 7과 같이 수신안테나로 생각하고 수전점에는 안테나 단자에 유기된 전압을 검지하기 위한 다이오드와 필터로 구성된 안테나 전압계와 직류전압계를 접속한다. 그림 7에서 J 는 전류원을 나타내는데 다이폴 안테나에 흐르는 전류분포를 생각하면 된다. 이 전류분포를 제어하기 위해 안테나에 접속된 리액턴스 소자 jX 를 적절히 조절하여 직류전압계의 지시치가 최소 또는 최대가 되도록 하고, 이 때의 제어소자의 값 X (구체적으로는 길이 l)를 읽으면 다음의 식으로부터 미지의 주파수 f 가 결정된다.

$$t_{1 \text{ or } 2}(f) - t_m = 0 \quad (14)$$

여기서, t_m 은 안테나가 강제로 공진할 때의 리액턴스 길이의 측정치이고, $t_{1 \text{ or } 2}$ 는 주파수가 주어졌을 때의 공진길이의 계산치이며 식 (12)와 식 (13)으로부터 계산된다. 식 (14)를 만족하는 주파수 f 를 해석적으로 구하기는 매우 어려운데, Muller법 등과 같은 수치해석법을 이용하면 수치해 f 를 구할 수 있다.

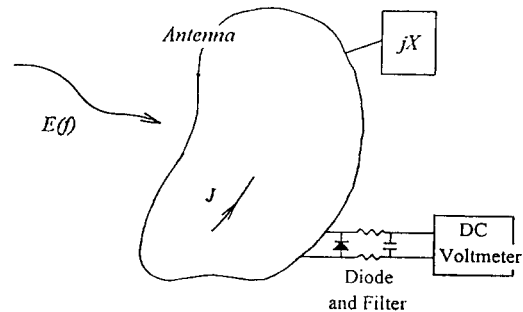


그림 7. 미지주파수 측정에서의 이용

Fig. 7. The application for the measurements of unknown frequency.

그림 7에서 리액턴스 소자를 조절하여 직류전압계의 지시치가 최대 또는 최소가 되도록 하는 리액턴스의 길이가 곧 직렬공진 또는 병렬공진에 해당한다. 이 사실은 그림 6으로부터 알 수 있다. 즉, 리액턴스의 길이를 조절하였을 때 직류전압계가 최대치를 지시하면 직렬공진에 해당하며, 최소치를 지시하면 병렬공진에 해당한다. 따라서, 리액턴스의 길이를 조절하여 직류전압계의 지시치가 최대인 경우(직렬공진)에는 식 (12)와 식 (14)로부터 미지 주파수를 결정할 수 있으며, 지시치가 최소인 경우(병렬공진)에는 식 (13)과 식 (14)로부터 미지의 주파수를 결정할 수 있다.

그림 7과 같은 안테나를 미지주파수의 측정에 사용할 때는 안테나에 접속하는 리액턴스 소자가 유한한 크기를 가지므로 리액턴스 소자에는 전류가 흐르게 되며 안테나 주위의 전자계를 흐트러지게 한다. 본 논문에서는 이러한 전류를 모두 무시하고 있다. 따라서, 장치를 구성하여 주파수의 측정에 이용할 때에는 오차를 생성시키게 되므로 주의가 필요하다.

V. 결 론

리액턴스 소자를 갖는 전기적 소형다이폴 안테나의 강제 공진특성을 해석하고 이를 미지 주파수의 측정에 응용 가능함을 검토하였다. 이론 해석에는 다이폴 안테나에 흐르는 전류분포에 관한 적분방정식을 풀기 위해 모멘트 법을 사용했으며, 강제 공진특성을 검토하기 위하여 급전점 및 장하점에 착목한 2단자 회로망으로부터 안테나가 강제적으로 공진하는 리액턴스의 값을 결정하는 결정방정식을 도출하였다.

이론 해석의 결과, 안테나에 부착한 리액턴스 소자를 적절히 조절하면 소형다이폴 안테나를 강제적으로 공진시킬 수 있으며, 이 때의 강제 공진은 직렬 및 병렬공진의 두 가지 종류가 존재한다는 것을 알았다. 이러한 강제 공진특성의 응용은 여러가지를 생각할 수 있으나 본 논문에서는 하나의 응용 예

로써 미지 주파수의 측정에 이용할 수 있다는 것을 원리적인 면에서 검토하였다.

본 논문에서는 강제 공진특성의 이론 해석과 응용 가능성의 검토에 중점을 두었으므로 응용 예에 관한 실험은 실시하지 않았다. 주파수 측정용 소형 안테나의 제작과 측정오차의 해석 등은 남겨진 과제이다.

참 고 문 헌

- [1] K. Fujimoto et. al., *Small Antennas*, John Wiley & Sons Inc., New York, 1987.
- [2] R. F. Harrington and J. Mautz, "Straight wires with arbitrary excitation and loading," *IEEE Trans.*, AP-15, pp. 502-515, 1967.
- [3] K. C. Kim, "A Resonant Frequency Control Dipole Antenna for Measurements of Unknown Frequency," *Proc. of 3rd FIT-Ajou University Joint Seminar*, pp. 53-60, July 1993.
- [4] C. W. Harrison, "Monopole with Inductive Loading," *IEEE Trans.*, AP-11, 4, pp. 394-400, July 1963.
- [5] IEICE ed., *Antenna Engineering Handbook*, Chap. 3, Ohm, Tokyo, 1980.
- [6] R. E. Collin, *Antennas and Radiowave Propagation*, Chap. 3, McGraw-Hill, New York, 1985.
- [7] R. F. Harrington, *Field Computation by Moment Methods*, Macmillan, New York, 1968.

김 기 채



1984년 2월 : 영남대학교 공과대학
전자공학과(공학사)

1986년 3월 : 일본 Keio Univ. 대학
원 전기공학과(공학석사)

1989년 3월 : 일본 Keio Univ. 대학
원 전기공학과(공학박사)

1989년 4월~1993년 3월 : 한국표준과학연구원 전자파연구실
선임연구원

1993년 4월~1995년 8월 : 일본 후쿠오카공업대학 정보공학
과 조교수

1995년 9월~현재 : 영남대학교 전기전자공학부 조교수

[주 관심분야] : 전자파이론 및 안테나, EMC /EMI, 전자파
응용 등.