

강제 공진형 EMI 다이폴 안테나에 대한 정규화 시험장 감쇠량 이론곡선

Theoretical Curve of Normalized Site Attenuation for Forced Resonant Type EMI Dipole Antennas

김기채

Ki-Chai Kim

요약

본 논문은 80 MHz 이하의 주파수 대역에서 사용하는 강제 공진형 EMI 다이폴 안테나에 대한 정규화 시험장 감쇠량 이론곡선을 계산하고 있다. 이론 해석으로서는 안테나에 흐르는 전류분포에 관한 연립적분방정식을 유도하고 구분 정현함수를 사용한 Galerkin의 모멘트 법으로 그 해를 구하여 정규화 시험장 감쇠량을 검토하고 있다. 그 결과, 강제 공진형 EMI 다이폴 안테나는 80 MHz 이하 주파수 대역의 정규화 시험장 감쇠량 측정에 유용하게 사용할 수 있음을 확인할 수 있었다. 제시된 정규화 시험장 감쇠량 이론치는 강제 공진형 EMI 다이폴 안테나를 사용하여 야외시험장의 적합성을 평가할 때 기준이론 곡선으로 활용할 수 있다.

Abstract

This paper presents the normalized site attenuation characteristics for frequencies below 80 MHz using forced resonant type EMI dipole antennas. The coupled integral equations for unknown current distribution are solved by the Galerkin's method of moments with piecewise sinusoidal functions. The results show that the forced resonant type EMI dipole antenna for frequencies below 80 MHz can be used effectively for the measuring normalized site attenuation. The calculated normalized site attenuation curves for the forced resonant type EMI dipole antenna are useful in determining the suitability of open area test sites.

Key words : EMI Antennas, Forced Resonance, Normalized Site Attenuation

I. 서론

방사성 장애전자파의 측정에 사용하는 야외시험장(OATS: Open Area Test Site)의 적합성 평가에는 적합성 평가 파라미터로서 시험장 감쇠량(CSA: Classical or Conventional Site Attenuation)이 이용되며, 측정 자동화를 위해 광대역 안테나의 사용에 적합한 정규화 시험장 감쇠량(NSA: Normalized Site Attenuation)의 개념도 제안되었다^{[1],[2]}.

80 MHz 이하의 주파수 대역에서는 안테나의 물리적 크기가 커지므로 80 MHz에 공진하는 안테나를 사용하여 30~80 MHz의 주파수 대역에 대한 적합성 평가를 실시하도록 하고 있다. 그러나, 80 MHz에 공진하는 안테나는 80 MHz 이하의 주파수 대역에 대해서는 소형 안테나가 되므로 감도특성이 나쁘다는 단점이 있다. 감도특성이 좋은 안테나를 사용하고자 하면 반파장 공진 다이폴 안테나가 적합한데, 이 경우에는 낮은 주파수 대역인 80 MHz 이하의 주파수

「본 연구는 대학 IT 연구센터인 충남대학교 전자파환경기술연구센터의 지원으로 수행되었음.」

영남대학교 전자정보공학부(School of Electrical Engineering and Computer Science, Yeungnam University)

· 논문 번호 : 20040220-019

· 수정완료일자 : 2004년 3월 26일

대역에서는 안테나의 물리적 길이가 길어지므로(예를 들면, 30 MHz에서 반파장 길이는 5 m가 됨) 수평편파로 사용하는 경우에는 안테나의 끝단이 쳐지고 수직편파인 경우에는 휘어짐이 발생하여 측정오차의 원인이 됨과 동시에 취급의 불편함이 있었다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 80 MHz 이하의 주파수 대역에서 방사성 장애전자파의 측정용으로 사용할 수 있는 소형이면서 감도특성이 좋은 강제 공진형의 EMI 다이폴 안테나가 제안되었다^[3].

본 논문에서는 80 MHz 이하의 주파수 대역에서 방사성 장애전자파의 측정에 사용하기 위해 제안된 강제 공진형 EMI 다이폴 안테나^[3]를 야외시험장의 적합성 평가에 사용할 경우, 적합성 평가에 적용할 수 있는 정규화 시험장 감쇠량의 기준 이론곡선을 모멘트 법으로 계산한 결과를 제시하였다. 이론해석 방법으로서, 야외시험장 위에 강제 공진형 EMI 다이폴 안테나를 송신 및 수신 안테나로 설치하였을 때, 각 안테나에 흐르는 전류분포에 관한 연립 적분 방정식을 유도하고, 그 해를 모멘트 법^[4]으로 구하여 정규화 시험장 감쇠량을 계산하고 있다. 그 결과, 80 MHz 이하의 주파수 대역에서 반파장 공진 다이폴 안테나를 사용하는 대신, 소형인 강제 공진형 EMI 다이폴 안테나를 사용하면 소형이므로 안테나의 취급이 간편할 뿐만 아니라 측정오차도 줄일 수 있으며, 반파장 공진 다이폴 안테나를 사용하는 경우와 거의 동일한 감도특성을 갖는 NSA 측정계를 구성할 수 있음을 확인할 수 있었다.

II. NSA 측정계의 이론 해석

그림 1은 야외시험장의 정규화 시험장 감쇠량을 측정하기 위한 측정계를 나타낸다. 무한히 넓은 완전도체 평판 위에 반경이 α 인 송신 안테나(#1) 및 수신 안테나(#2)가 각각, 높이 h_1 및 h_2 의 위치에 간격 d 로 설치되어 있다. 단, 송신 및 수신 안테나는 30~80 MHz 대역에서는 강제 공진형 EMI 다이폴 안테나^[3]를 사용하고, 90~1,000 MHz 대역에서는 반파장 공진 다이폴 안테나를 사용한다. 송신 안테나 #1에는 신호 발생기로부터 전압 V 가 급전되고, 수신 안테나 #2에는 내부 저항이 R_L 인 수신기가 부하 $Z_L (=R_L + j0)$ 로 접속되어 있다.

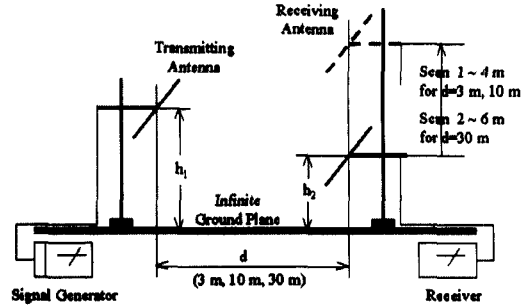


그림 1. 야외시험장의 시험장 감쇠량 측정계
Fig. 1. Site attenuation measurement system of an open area test site.

그림 1에서 시험장 감쇠량은 송신 안테나 #1로부터 방사되는 전력의 시험장 전송 손실로서 정의되며 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$C_{SA} = \frac{P_t}{P_r} = \frac{\text{Re}\{Z_m\} |I_1|^2}{\text{Re}\{Z_L\} |I_2|^2} \quad (1)$$

여기서, P_t 는 송신 안테나 #1에서 방사되는 방사전력, P_r 은 수신 안테나 #2에서 수신되는 수신전력을 나타내며, Z_m 은 수신 안테나 #2에 부하 Z_L 이 접속되었을 때의 송신 안테나 #1의 입력 임피던스, I_1 은 송신 안테나 #1의 단자 전류, I_2 는 수신 안테나 #2의 단자 전류를 나타낸다. Re 는 복소수 $\{*\}$ 의 실수부를 나타낸다.

정규화 시험장 감쇠량은 식 (1)의 시험장 감쇠량 C_{SA} 를 시험장 감쇠량의 측정에 사용한 송, 수신 안테나의 안테나 인자로 정규화한 것으로서 다음 식으로 정의된다.

$$N_{SA} = \frac{C_{SA}}{K_1 K_2} \quad (2)$$

여기서, K_1 및 K_2 는 각각 송신 안테나 #1의 안테나 인자 및 수신 안테나 #2의 안테나 인자이다. 정규화 시험장 감쇠량의 식 (2)를 데시벨로 표현하면 다음과 같다.

$$N_{SA} = C_{SA} - (K_1 + K_2) \quad (3)$$

식 (3)의 정규화 시험장 감쇠량을 구하기 위해서는 안테나의 입력 임피던스와 송, 수신 안테나의 안테나 인자를 계산하여야 한다. 본 논문에서는 그림 1

의 NSA 측정계에서 송, 수신안테나 #1, #2에 흐르는 전류분포를 구하여 입력 임피던스와 안테나 인자를 계산한다.

그림 1의 송신 안테나 #1 및 수신 안테나 #2에 흐르는 전류분포 J_1 및 J_2 에 관한 적분 방정식은 다음 식으로 주어진다.

$$\frac{1}{j\omega\epsilon_0} \iint_{S_1} [\overline{K}_{11}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \mp \overline{K}_{12}(\mathbf{r}, \mathbf{r}')] \cdot \mathbf{J}_1(\mathbf{r}') dS_1' + \frac{1}{j\omega\epsilon_0} \iint_{S_2} [\overline{K}_{21}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \mp \overline{K}_{22}(\mathbf{r}, \mathbf{r}')] \cdot \mathbf{J}_2(\mathbf{r}') dS_2' = -V\delta(x)\hat{x} \quad (4)$$

$$\frac{1}{j\omega\epsilon_0} \iint_{S_1} [\overline{K}_{21}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \mp \overline{K}_{22}(\mathbf{r}, \mathbf{r}')] \cdot \mathbf{J}_1(\mathbf{r}') dS_1' + \frac{1}{j\omega\epsilon_0} \iint_{S_2} [\overline{K}_{11}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \mp \overline{K}_{12}(\mathbf{r}, \mathbf{r}')] \cdot \mathbf{J}_2(\mathbf{r}') dS_2' = Z_1 I_2(0)\delta(x)\hat{x} \quad (5)$$

여기서, \hat{x} 는 x 방향의 단위벡터, ϵ_0 는 진공의 유전율, ω 는 각주파수이고, S_1 및 S_2 는 각각 송신 안테나 #1 및 수신 안테나 #2의 표면이다. 또한, \mathbf{r} 및 \mathbf{r}' 는 각각 관측점 및 파원점의 위치벡터이고, $\delta(x)$ 는 Dirac의 델타함수이다. 연립 적분방정식 식 (4), 식 (5)에서 복호의 마이너스 부호(-)는 수평편파인 경우, 플러스 부호(+)는 수직편파인 경우이다.

위의 연립 적분방정식에서 적분핵 $\overline{K}_{ij}(i, j=1, 2, 3, 4)$ 는 자유공간 중의 전류원이 전계를 생성하는 dyadic Green 함수이며 다음 식으로 주어진다.

$$\overline{K}_{ij}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = (\overline{I}k_0^2 + \nabla\nabla) \cdot \overline{G}_{ij}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \quad (6)$$

$$\overline{G}_{ij}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = \overline{I} \frac{e^{-jk_0 R_{ij}}}{4\pi R_{ij}} \quad (7)$$

여기서, \overline{I} 는 단위 dyadic, R_{ij} 는 파원과 관측점 사이의 거리이며 $k_0 = \omega\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$ 이다. 식 (6)과 식 (7)에서 아래첨자 $i, j=1, 2, 3, 4$ 는 안테나 #1, #2, #3, #4를 나타내며, #3 및 #4는 각각, 송신 안테나 #1 및 수신 안테나 #2의 영상 안테나를 나타낸다.

전류분포에 관한 연립 적분방정식 식 (4), 식 (5)의 해는 모멘트 법^[4]을 사용하여 구한다. 먼저 전류분포를 기지의 함수 F_m 및 F_n 으로 다음과 같이 전개한다.

$$\mathbf{J}_1 = \sum_{m=1}^M I_m \mathbf{F}_m \quad (8)$$

$$\mathbf{J}_2 = \sum_{n=1}^N I_n \mathbf{F}_n \quad (9)$$

여기서, I_m 및 I_n 은 구해야 할 전류분포의 복소 전개 계수이다.

식 (8), 식 (9)를 연립 적분방정식 식 (4), 식 (5)에 대입하고 Galerkin의 방법을 적용하면 식 (4), 식 (5)는 다음과 같은 연립 일차방정식으로 변환된다.

$$\sum_{m=1}^M I_m Z_{m'm} + \sum_{n=1}^N I_n Z_{m'n} = V_m' \quad (10)$$

$$\sum_{m=1}^M I_m Z_{n'm} + \sum_{n=1}^N I_n Z_{n'n} = V_n' \quad (11)$$

여기서, $Z_{m'm}$ 및 V_m' 등은 각각 일반화 임피던스 및 전압이며 구체적인 표현식은 생략한다. 식 (8), 식 (9)에서 전개함수는 구분정현함수(piecewise sinusoidal function)를 사용하였으며, 전개함수는 입력 임피던스의 수렴을 확인하여 $M, N=29$ 를 선택하였다.

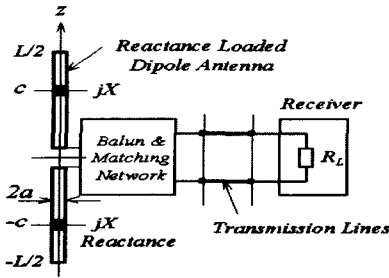
이상과 같이 모멘트 법으로 정식화한 결과식을 이용하여 안테나에 흐르는 전류분포를 구해 정규화 시험장 감쇠량을 계산한다.

III. 정규화 시험장 감쇠량의 계산 결과

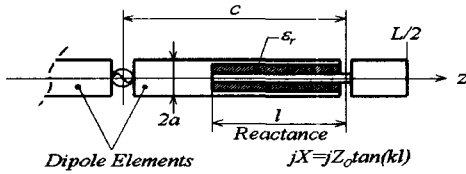
정규화 시험장 감쇠량을 계산하기 위해서는 그림 1에 나타낸 송, 수신 안테나 #1, #2의 제원을 결정해야 한다. 30~80 MHz의 주파수 대역에서 사용하기 위해 소형 안테나로 제안된 강제 공진형 EMI 다이폴 안테나^[3]의 제원은 표 1과 같으며 구조는 그림 2

표 1. 강제 공진형 EMI 다이폴 안테나의 제원
Table 1. Specifications of forced resonant type EMI dipole antennas.

Frequency (MHz)	$L = 0.3 \lambda$ $2a = 6.350 \text{ mm}, C = 0.133 \lambda$		
	Antenna length (m)	Loading position (m)	Loading reactance (Ω)
30	3.000	1.333	1732.89
35	2.571	1.143	1654.26
40	2.250	1.000	1586.20
45	2.000	0.889	1526.24
50	1.800	0.800	1472.66
60	1.500	0.667	1380.12
70	1.286	0.571	1302.09
80	1.125	0.500	1234.70



(a) 구성도
(a) Schematic diagram



(b) 장하 리액턴스의 구성
(b) Construction of loading reactance

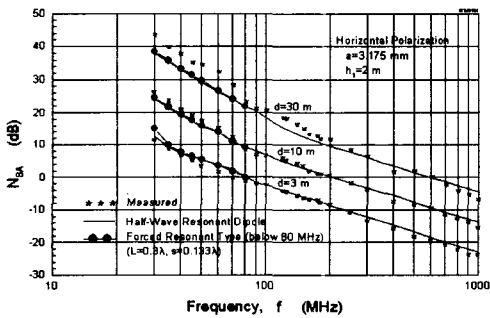
그림 2. 강제 공진형 EMI 다이폴 안테나
Fig. 2. Forced resonant type EMI dipole antenna.

에 나타내었다. 그림 2에 나타낸 것처럼, 강제 공진형 EMI 다이폴 안테나는 정합을 취하기 위해 C의 위치에 리액턴스를 장하한 구조이며 안테나에 대한 구체적인 내용은 참고문헌 [3]을 참조하기 바란다.

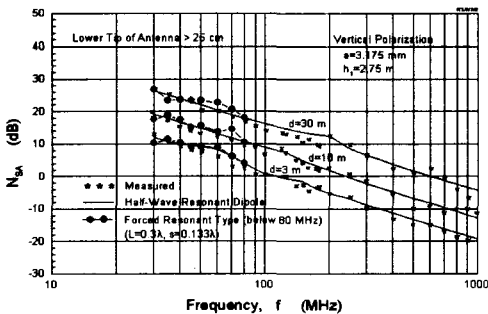
본 논문에서는 강제 공진형 EMI 다이폴 안테나를 사용했을 경우의 정규화 시험장 감쇠량과 비교하기 위해 반파장 공진 다이폴 안테나를 사용하였을 경우의 정규화 시험장 감쇠량도 함께 나타내었다. 정규화 시험장 감쇠량의 비교를 위해 30~1,000 MHz의 주파수 대역에서 사용한 반파장 공진 다이폴 안테나의 제원은 표 2와 같다^[5]. 강제 공진형 EMI 다이폴

표 2. 반파장 공진 다이폴 안테나의 제원
Table 2. Specifications of half-wavelength resonant dipole antennas.

Frequency (MHz)	Half-wavelength resonant dipole		
	Resonant length L	Antenna length (cm)	Antenna diameter (mm)
30	0.4805λ	480.50	6.350
35	0.4799λ	411.34	6.350
40	0.4795λ	359.63	6.350
45	0.4790λ	319.33	6.350
50	0.4786λ	287.16	6.350
60	0.4778λ	238.90	6.350
70	0.4771λ	204.47	6.350
80	0.4765λ	178.69	6.350
90	0.4759λ	158.63	6.350
100	0.4754λ	142.62	6.350
125	0.4742λ	113.81	6.350
150	0.4731λ	94.62	6.350
175	0.4721λ	80.93	6.350
200	0.4712λ	70.68	6.350
250	0.4696λ	56.35	6.350
300	0.4683λ	46.83	6.350
350	0.4761λ	40.81	1.588
400	0.4754λ	35.66	1.588
500	0.4742λ	28.45	1.588
600	0.4731λ	23.66	1.588
700	0.4721λ	20.23	1.588
800	0.4712λ	17.67	1.588
900	0.4704λ	15.68	1.588
1000	0.4699λ	14.10	1.588



(a) 수평편파
(a) Horizontal polarization



(b) 수직편파
(b) Vertical polarization

그림 3. 정규화 시험장 감쇠량의 주파수 특성
Fig. 3. Frequency characteristics of normalized site attenuation.

안테나 및 반파장 공진 다이폴 안테나는 모두 Roberts Balun이 부착되어 있다.

그림 3은 식 (3)으로부터 계산한 정규화 시험장 감쇠량의 주파수 특성을 나타낸다. 그림 3(a)는 수평 편파인 경우, 그림 3(b)는 수직 편파인 경우에 대한 정규화 시험장 감쇠량의 주파수 특성이다. 그림 3에서 실선은 반파장 공진 다이폴 안테나를 사용했을 경우의 정규화 시험장 감쇠량을 나타내며, 동그라미를 가진 파선은 강제 공진형 EMI 다이폴 안테나를 사용했을 경우의 정규화 시험장 감쇠량을 나타낸다. * 표시는 정규화 시험장 감쇠량의 측정치를 나타낸다⁶⁾.

그림 3으로부터 알 수 있는 것처럼, 30~80 MHz의 주파수 대역에서 강제 공진형 EMI 다이폴 안테나를 사용하면 반파장 공진 다이폴 안테나를 사용했을 경우와 거의 동일한 정규화 시험장 감쇠량 특성을 얻을 수 있다. 즉, 소형인 안테나로서도 감도가 좋은 안테나를 실현할 수 있으므로 야외시험장의 적합성 평가용으로 적합함을 알 수 있다.

이와 같이, 강제 공진형 EMI 다이폴 안테나를 사용하면 기존의 반파장 공진 다이폴 안테나를 사용한 정규화 시험장 감쇠량의 측정에서 나타나는 문제점(안테나의 길이가 길어지므로 안테나 양 끝단이 처

표 3. 정규화 시험장 감쇠량의 이론치
Table 3. Theoretical normalized site attenuations.

Antenna Type & Frequency(MHz)		Normalized Site Attenuation, N_{SA} (dB)					
		Horizontal Polarization			Vertical Polarization		
		3 m	10 m	30 m	3 m	10 m	30 m
Forced Resonant Type EMI Dipole Antennas	30	15.027	24.495	38.402	11.055	17.819	25.788
	35	9.918	21.803	35.756	11.365	18.803	24.386
	40	7.496	19.550	33.331	12.329	18.422	23.588
	45	6.459	17.583	31.429	8.908	15.732	23.414
	50	5.326	15.927	29.649	10.023	14.679	23.480
	60	3.531	14.046	26.603	9.167	12.900	22.615
	70	1.839	10.967	24.041	6.743	14.520	21.225
	80	0.016	9.148	21.856	4.082	11.033	18.052
Half-wavelength Resonant Dipole Antennas	90	-1.866	7.816	20.492	2.042	9.650	17.009
	100	-2.534	6.805	18.335	0.805	8.683	16.237
	125	-4.371	4.466	14.854	-0.628	7.376	14.668
	150	-6.011	2.858	12.557	-1.622	4.990	13.566
	175	-7.149	1.539	10.825	-3.760	3.244	12.818
	200	-8.585	0.195	9.453	-5.270	1.816	12.374
	250	-10.576	-1.680	7.573	-6.816	-0.425	8.665
	300	-12.201	-3.346	5.931	-8.772	-2.169	6.502
	350	-13.496	-4.792	4.529	-9.985	-3.578	5.058
	400	-14.693	-5.456	3.428	-11.197	-4.794	3.775
	500	-16.623	-7.698	1.417	-13.188	-6.811	1.729
	600	-18.484	-9.281	-0.066	-14.776	-8.298	0.075
	700	-19.779	-10.631	-1.361	-16.112	-9.619	-1.300
	800	-20.981	-11.854	-2.572	-17.260	-10.814	-2.475
900	-22.052	-12.861	-3.600	-18.299	-11.884	-3.319	
1000	-22.887	-13.810	-4.528	-19.240	-12.831	-4.300	

지고 휘어지며 측정오차를 발생시키는 문제점 등)을 극복할 수 있을 것으로 생각된다.

그림 3의 정규화 시험장 감쇠량을 구체적인 수치로 나타내면 표 3과 같다. 표 3은 강제 공진형 EMI 다이폴 안테나(30~80 MHz) 및 반파장 공진 다이폴 안테나(90~1,000 MHz)를 사용하였을 경우의 정규화 시험장 감쇠량의 이론치를 나타내며 야외시험장의 적합성 평가에 있어서 기준 이론곡선으로 활용할 수 있다. 일반적인 시험장 감쇠량(CSA: Conventional Site Attenuation)에 대해서는 별도의 논문에서 검토하기로 한다.

IV. 결 론

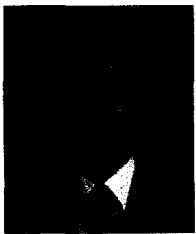
방사성 장애전자파를 측정하기 위한 측정시설의 하나인 야외시험장의 적합성 평가에 강제 공진형 EMI 다이폴 안테나를 사용하였을 경우의 정규화 시험장 감쇠량 이론 곡선을 검토하였다. 그 결과, 80 MHz 이하의 주파수 대역에서 반파장 공진 다이폴 안테나를 사용하는 대신, 소형인 강제 공진형 EMI 다이폴 안테나를 사용하면 소형이므로 안테나의 취급이 간편할 뿐만 아니라 측정오차도 줄일 수 있으며, 반파장 공진 다이폴 안테나를 사용하는 경우와 거의 동일한 감도특성을 갖는 NSA 측정계를 구성할 수 있음을 확인할 수 있었다. 본 논문에서 제시한 정

규화 시험장 감쇠량의 이론치는 강제 공진형 EMI 다이폴 안테나를 사용한 야외시험장의 적합성 평가에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] ANSI 63.4-1992, "American national standard for methods of measurement of radio-noise emissions from low-voltage electrical and electronic equipment in the range of 9 kHz to 40 GHz", 1992.
- [2] A. A. Smith, Jr., R. F. German and J. B. Pate, "Calculation of site attenuation from antenna factors", *IEEE Trans. EMC-24*, pp. 301-316, Aug. 1982.
- [3] K. -C. Kim, "EMI dipole antennas with forced resonance by reactance loading for frequencies below 80 MHz", *IEICE Trans. Commun.*, vol. E85-B, no. 11, pp. 2489-2494, Nov. 2002.
- [4] R. F. Harrington, *Field computation by Moment Methods*, *IEEE Press*, New York, 1993.
- [5] K. -C. Kim, S. Tokumaru, "Antenna factors of half-wavelength dipole antennas with Roberts Balun", *IEICE Trans.*, vol. J78-B-II, no. 11, pp. 717-724, Nov. 1996.
- [6] 박병권, 김정환, 강찬구, 박정일, 강웅택, "안테나 성능 평가기술 개발", 과학기술처, 1994년.

김 기 채



1984년: 영남대학교 전자공학과 (공학사)

1986년: Keio Univ. 대학원 (공학석사)

1989년: Keio Univ. 대학원 (공학박사)

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

1993년 4월~1995년 8월: 일본 후쿠오카공업대학 정보공학과 조교수

1995년 9월~현재: 영남대학교 전자정보공학부 부교수

2002년 1월~현재: 한국전자파학회 학회지 편집위원장, 상임이사

[주 관심분야] EMC/EMI 관련 안테나 및 측정시설, 소형 안테나, 전자파이론 및 응용