

보조 포텐셜 함수를 이용한 선형 안테나 해석

정우혁, 송찬미, 황금철

성균관대학교

uhjeong93@skku.edu, 94chanmi@gmail.com, khwang@skku.edu

Linear antenna analysis using auxiliary potential function

Woo Hyeok Jeong, Chan Mi Song, Keum Cheol Hwang
Sungkyunkwan Univ.

요약

본 논문은 보조 포텐셜 함수를 이용하여 선형 안테나를 해석하였다. 다이폴 혹은 모노폴의 구조를 갖는 선형 안테나의 방사 특성을 분석하기 위해 보조 포텐셜 함수 개념을 도입하였고 맥스웰 방정식으로부터 헬름홀츠 방정식을 유도하였다. 이에 그린 함수 및 원거리 근사를 적용하여 다이폴 및 모노폴 안테나의 radiation field를 구하였고 안테나 길이에 따른 방사패턴 분포 차이를 확인하였다. 또한 계산된 방사패턴을 안테나 시뮬레이션 결과와 비교분석하였다. 도출된 radiation field를 기반으로 Poynting vector, radiation power, radiation intensity, directivity, gain 등 안테나 성능 지표를 유도하였다.

I. 서론

본 논문에서는 다이폴 안테나와 모노폴 안테나의 방사 특성을 살펴볼 것이다. 다이폴 안테나는 현대에 가장 광범위하게 사용되고 있는 안테나로, 직선 도체 두 개를 일직선으로 나열한 구조이며 모노폴 안테나는 다이폴 안테나의 절반으로 동작하고 수직의 직선상 도체를 갖는 안테나이다. 본 논문에서는 보조 포텐셜 함수를 이용하여 다이폴 안테나와 모노폴 안테나의 방사 특성을 해석하고 계산된 방사패턴을 시뮬레이션 결과와 비교하고 분석함으로써 전자기장의 전파 원리와 안테나의 역할을 이해하고 안테나의 성능 지표들을 유도하여 분석한다.

II. 본론

1. 보조 포텐셜 함수

보조 포텐셜 함수는 전자기장의 계산을 보다 수월하게 할 수 있도록 해주어 복잡한 적분을 상대적으로 쉬운 적분과 미분으로 대체해주는 역할을 한다. 맥스웰 방정식의 시간 고조파 형식(time-harmonic form)에서 자기적 성분의 소스 \bar{M} 와 ρ_m 이 0이라 가정하고 null identity를 이용하여 정리하면 자기장의 보조 포텐셜 \bar{A} 를 구할 수 있다. 동일한 방법으로 전기적 성분의 소스를 0이라 가정하면 전기 보조 포텐셜 \bar{F} 를 구할 수 있으며 이는 식(1), (2)와 같이 쓸 수 있다.

$$(\nabla^2 + k^2)\bar{A} = -\mu\bar{J} \quad (1)$$

$$(\nabla^2 + k^2)\bar{F} = -\varepsilon\bar{M} \quad (2)$$

이와 같은 같은 비동차 헬름홀츠 방정식을 풀기 위해 '그린 함수'라는 특수한 함수를 이용한다. 이를 길이가 l 인 다이폴 안테나에 적용하여 보조 포텐셜 함수 \bar{A} 를 구하면 식(3)과 같다.

$$A_z = \mu \frac{I_0 e^{-jkr}}{2\pi kr} \left[\frac{\cos\left(\frac{kl}{2}\cos\theta\right) - \cos\left(\frac{kl}{2}\right)}{\sin^2\theta} \right] \quad (3)$$

2. 복사장

식(3)을 좌표계 변환을 통해 구 좌표계로 바꾼 뒤에 다이폴 안테나의 전기장 E_θ 를 구하면 식(4)와 같다.

$$E_\theta = -j\omega A_\theta = j\eta \frac{I_0 e^{-jkr}}{2\pi r} \left[\frac{\cos\left(\frac{kl}{2}\cos\theta\right) - \cos\left(\frac{kl}{2}\right)}{\sin\theta} \right] \quad (4)$$

식 (4)로부터 다이폴 안테나 방사에 따른 포인팅 벡터나 안테나가 전자기장을 발생시킬 때 나타나는 지향성과 복사 저항 등을 계산할 수 있다. 일련의 이와 같은 과정을 길이가 다이폴 안테나의 절반인 모노폴 안테나($l' = 0.5l$)에서도 동일하게 적용 가능하며 다이폴 및 모노폴 안테나의 길이에 따른 안테나 복사 특성 파라미터들은 각각 표 1과 같다.

표 1. 안테나의 길이에 따른 복사 특성

		다이폴 안테나	모노폴 안테나
복사장	$l = 0.5\lambda$	$E_{\theta,half} = j\eta \frac{I_0 e^{-jkr}}{2\pi r} \left[\frac{\cos\left(\frac{\pi}{2}\cos\theta\right)}{\sin\theta} \right]$	
	$l \ll \lambda$	$E_{\theta,small} = j\eta \frac{I_0 e^{-jkr}}{4\pi r} \left(\frac{kl}{2}\right)^2 \sin\theta$	
포인팅 벡터	$l = 0.5\lambda$	$\overline{W}_{av,half} = \hat{a}_r \frac{1}{2\eta} E_{\theta,half} ^2$	
	$l \ll \lambda$	$\overline{W}_{av,small} = \hat{a}_r \frac{1}{2\eta} E_{\theta,small} ^2$	
복사 강도	$l = 0.5\lambda$	$U(\theta, \phi)_{half} = r^2 W_{av,half}$	
	$l \ll \lambda$	$U(\theta, \phi)_{small} = r^2 W_{av,small}$	
복사 전력	$l = 0.5\lambda$	$P_{rad,half} = \eta \frac{ I_0 ^2}{8\pi} C_{in}(2\pi)$	$P_{rad,half} = \eta \frac{ I_0 ^2}{16\pi} C_{in}(2\pi)$
	$l \ll \lambda$	$P_{rad,small} = \frac{\eta I_0 ^2}{16\pi} \left(\frac{kl}{2}\right)^4 \left(\frac{4}{3}\right)$	$P_{rad,small} = \frac{\eta I_0 ^2}{32\pi} \left(\frac{kl}{2}\right)^4 \left(\frac{4}{3}\right)$
지향성	$l = 0.5\lambda$	1.643(2.16 dB)	3.286(5.17 dB)
	$l \ll \lambda$	1.5(1.76 dB)	3(4.77 dB)
복사 저항	$l = 0.5\lambda$	73 Ω	37 Ω
	$l \ll \lambda$	0.0003 Ω	0.00015 Ω

3. 방사 패턴 계산결과

그림 1과 그림 2는 각각 다이폴 안테나와 모노폴 안테나에서 유도된 복사장의 식과 시뮬레이션 결과 데이터를 MATLAB[5]을 통하여 계산한 결과(a)와 상용 시뮬레이션 툴(HFSS)[6]을 이용해 얻은 결과(b)이다.

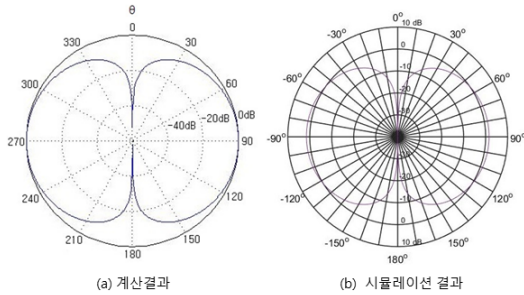


그림 2. $l = 0.5\lambda$ 의 길이를 갖는 다이폴 안테나의 방사 패턴

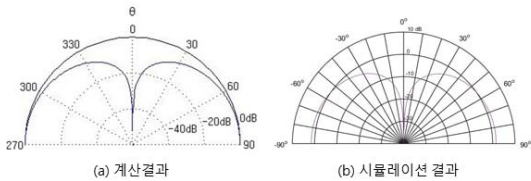


그림 3. $l' = 0.25\lambda$ 의 길이를 갖는 모노폴 안테나의 방사 패턴

그림 1과 그림 2는 길이 l 이 반파장일 때 $y-z$ 평면상의 안테나 방사 필드이다. 다이폴 안테나의 경우 θ 값이 $0^\circ, 180^\circ$ 인 방향으로서는 복사장을 전파시키지 않으며, $90^\circ, 270^\circ$ 방향으로 최대 크기의 복사장이 전파됨을 확인할 수 있다. 모노폴 안테나의 경우 θ 값이 0° 일 때와 $z < 0$ 일 때의 각도에서는 복사장이 전파되지 않으며, $90^\circ, 270^\circ$ 방향으로 최대 크기의 복사장이 전파된다. 이는 다이폴 안테나의 방사 패턴과 거의 일치하지만 $z < 0$ 인 영역에서는 필드가 방사되지 않는다는 차이가 있음을 확인할 수 있다.

식(4)에 따르면 파장에 대한 안테나의 길이 또는 주파수의 변화에 의해 방사 패턴이 달라지므로 길이에 따른 안테나의 방사 패턴을 비교하였다(그림 3, 4 참고). 이를 통해 다이폴 안테나와 모노폴 안테나에서 길이에 따라 방사 패턴이 바뀔 수 있음을 확인할 수 있다.

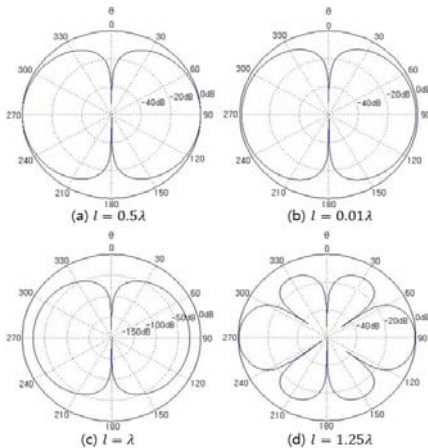


그림 4. 안테나 길이 l 에 따른 다이폴의 방사 패턴

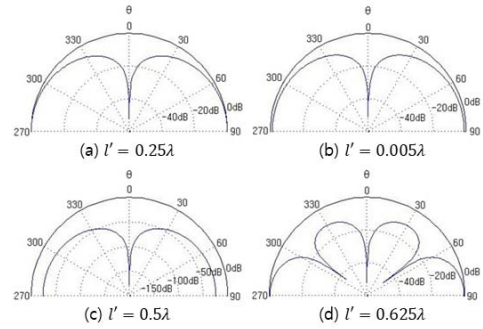


그림 5. 안테나의 길이 l' 에 따른 모노폴의 방사 패턴

III. 결론

본 논문에서는 보조 포텐셜 함수를 이용하여 맥스웰 방정식을 풀어냄으로써 다이폴 안테나와 모노폴 안테나의 기본적인 복사 특성을 해석하였다. 계산 과정에서 필요한 적분 공식과 헬름홀츠 방정식, 그린 함수 등을 적용하여 다이폴 안테나와 모노폴 안테나의 길이에 따라 달라지는 복사장 값을 계산하였으며 식을 유도하고 이를 통해 포인팅 벡터와 복사강도, 복사 전력 등을 유도하였다. 또한 계산한 결과는 시뮬레이션 결과와 서로 일치함을 확인하였다. 따라서 본 논문에서 제안한 보조 포텐셜 함수를 이용한 안테나의 복사 특성 분석 방법은 간단한 구조의 선형 안테나부터 다양하게 응용된 선형 안테나 해석에 유용하게 활용할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 김기채, 김상명, 김기출, 권재용, 강태원, 김정환, “모멘트 법과 기전력법을 적용한 계산가능 다이폴안테나의 안테나 인자 특성 비교”, 한국 전자과학회, 한국전자과학회논문지, 2012.3
- [2] 이병현, 김정기, “4개의 펄스 기저함수를 갖는 모멘트법에 의한 회전체의 전류분포 특성 = The Current Distribution of Body of Revolution by Method of Moments Using four Pulse Basis Functions”, 대한전자공학회 학술대회, 1986.
- [3] 이현진, 임영석, “전방향 복사패턴의 이중대역 프린트형 모노폴안테나”, 대한전자공학회, 전자공학회논문지-TC 40(11), 2003.11, 99-104 (6 pages)
- [4] C. A. Balanis, "Antenna Theory: Analysis and Design," WILEY, 2012, pp. 133-150.
- [5] MATLAB R2010a, <http://www.mathworks.com>.
- [6] Ansoft High Frequency Structure Simulator (HFSS), ver. 13, <http://www.ansys.com>.