

Yagi-Uda 안테나의 최적설계에 관한 연구

이 선 미 . 천 창 율
강원대학교 전기공학과

A Study on Optimum Design of Yagi-Uda Antenna

Seon-Mi Lee, Changyul Cheon

Dept. of Electrical Eng. Kangwon National University

Abstracts

An optimization technique applicable to the Yagi-Uda antenna was proposed in this paper. An objective function, which is the gain of the antenna in our case, was computed using method of moments. Design variables for the Yagi-Uda antenna were chosen with lengths, positions and diameters of the antenna elements. For the optimization process, the evolution strategy technique was adopted. The results were compared with existing results and showed better performances.

I. 서 론

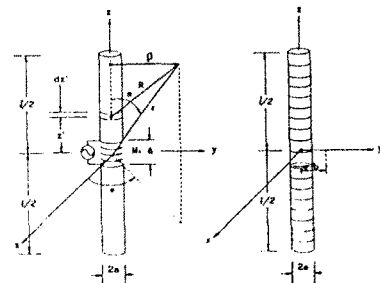
1927년과 1928년에 우다^[1]와 야기^[2]는 야기-우다 안테나에 대하여 발표하였고, 이후로 이 안테나에 대해 여러가지 자료가 발표되었으나 대부분 이론조사의 방법보다 실험자료에 근거를 두고 있다. 구조가 복잡한 경우에 있어서 실제로 안테나의 기하학적 이론적인 해석만으로는 거의 정확한 해석이 불가능하다. 따라서 안테나에 대한 비교적 정확한 해석은 1960년대 이후 컴퓨터의 급속한 발전에 힘입어 수치해석적인 방법이 도입되면서 본격화 되었다. 안테나에 대한 수치해석적 방법으로는 유한요소법 (Finite Element Method), 차등요소법 (Finite Difference Method), 모멘트법 (Method of Moment) 등이 있으나 안테나의 특성상 무한경계를 취급하여야 하므로 유한요소법이나 차등요소법은 그 해의 정확도에 있어서 한계가 있다. 반면에 모멘트법은 무한경계를 이론적으로 처리하므로써 안테나 해석에 있어서 매우 정확한 해를 제공하여 준다. 1969년 Thiele은 선형소자들의 균일하지 않은 길이와 간격을 갖는 배열을 해석하였다. D.K.Cheng 과 C.A.Chen은 1973년 6개의 선형소자로 이루어진 야기-우다 안테나에서 선형소자 길이를 일정하게 하고 선형소자 사이의 간격을 조정하여 최대 이득을 얻기 위해 선형소자 간격을 최적화하였고,^[3] 1975년에 간격을 최적화한 자료를 기초로 하여 선형소자 길이를 최적화하여 발표했다.^[4]

이 결과는 오늘날 가장 많이 사용되어지고 있으나 최적화 방법이 간격 및 길이의 최적화를 동시에 수행하지 않아 이 보다 더 좋은 배열의 구조가 있을 것으로 사료된다. 따라서 본 논문에서는 최대 이득을 갖기 위해 야기-우다 안테나 각 소자의 길이, 위치 및 반경을 최적화 하였으며, 해석 방법으로는 모멘트법을 사용하고 최적화 알고리즘으로는 통계학, 생물학, 열역학의 기본원리를 통합한 전체적 최적화 방법의 하나인 GES방법을 사용하였다.^{[5][6]}

II. 해석 및 설계방법

1. 모멘트법에 의한 선형안테나 해석

그림 1 과 같이 가는 도체의 원통모양(Thin Wire)으로 이루어진 선형소자의 안테나에 전압을 인가하면 길이 전체에 전류가 흐른다. 이 전류 분포를 구하기 위하여 필요한 적분방정식을 유도하고 이를 모멘트법을 이용하여 해석할 수 있다. Maxwell 방정식으로 부터 z 방향으로 흐르는 전류 I에 대하여



(a) Cylindrical dipole (b) Discretized model
Fig. 1 Cylindrical dipole

안테나 해석에 필요한 전기적분방정식(Electric Field Integral Equation)은

$$E_z^i = j\omega\mu \left(1 + \frac{1}{k^2} \frac{\partial^2}{\partial z^2}\right) \int_{-a}^a G(\vec{r}/\vec{r}') I(z') dz' \dots (1)$$

이며, 여기서 E_z^i : 입사전계, $k^2 = \omega^2 \mu \epsilon$,

$G(\vec{r}/\vec{r}')$: 자유공간에서의 Green function

$I(z')$: 안테나에 흐르는 전류

ω : 각주파수, μ : 투자율, ϵ : 유전율

\vec{r}' : 전류가 존재하는 점을 나타내는 위치벡터

\vec{r} : 벡터포텐셜 \vec{A} 를 구하고자 하는점의 위치벡터

$|\vec{r}-\vec{r}'| = \sqrt{(\rho-\rho')^2 + (z-z')^2}$ 이고 thin wire 이므로 전류가 wire의 중심으로부터 흐르고 wire의 표면에서의 전계를 취급한다고 가정하면 $|\rho-\rho'|$ 은 wire의 반경 a로 근사화 할 수 있다. 그러므로 식(1)은

$$E_z^i(z) = \frac{j\omega\mu}{k^2} \int_{-a}^a K(z/z') I(z') dz' \dots (2)$$

로 쓸 수 있고, 여기서

$$K(z/z') = (k^2 + \frac{\partial^2}{\partial z^2}) \frac{e^{-k\sqrt{a^2+(z-z')^2}}}{4\pi\sqrt{a^2+(z-z')^2}} \text{ 이다.}$$

식(2)는 모멘트법 중에 하나인 갤러킨 방법으로 미지수 전류 $I(z')$ 를 구할 수 있다. 모멘트법을 식(2)에 적용시키기 위하여 안테나에 흐르는 전류를 다음과 같이 근사화한다.

$$I(z') = \sum_{n=1}^M C_n(k) I_n(z') \dots (3)$$

여기서 $I_n(z')$ 는 기본함수이고 C_n 은 식(2)를 만족시키도록 구하여 지는 상수이다. 서로 일차독립인 $I_n(z')$ 을 다음과 같이 취한다.

$$I_n(z) = \begin{cases} \frac{\text{Sink}(z-z_{n-1})}{\text{Sink}\Delta} & z_{n-1} \leq z \leq z_n \\ \frac{\text{Sink}(z_{n+1}-z)}{\text{Sink}\Delta} & z_n \leq z \leq z_{n+1} \dots \dots \dots (4) \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases}$$

여기서 Δ 는 이산화된 안테나에서 인접한 두 절점간의 거리이다. 절리킨방법을 적용하기 위하여 가중함수를 기본함수와 같게 취하고 식(2)의 양변에 가중함수 $I_n(z)$ 를 내적하여 정리하면

$$\int_{z_{n-1}}^{z_n} E_z^*(z_n) I_n(z) dz = \int_{z_{n-1}}^{z_n} I_n(z) \frac{j\omega \mu}{4\pi k^2} \sum_{n=1}^N C_n (k^2 + \frac{\partial^2}{\partial z^2}) \cdot \int_{z_{n-1}}^{z_n} \frac{e^{-jk\sqrt{a^2+(z-z')^2}}}{\sqrt{a^2+(z-z')^2}} I_n(z') dz' dz \dots \dots (5)$$

이고, 위 식을 정리하면 다음과 같은 행렬 방정식을 얻을 수 있다.

$$[Z_{nm}] [C_n] = [E_m^*] \dots \dots \dots (6)$$

그러므로 $[Z_{nm}]$ 의 역행렬을 구하여 $[C_n]$ 을 구할 수 있고 이를 식(3)에 대입 하므로써 안테나의 전류분 구할 수 있다.

2. 최적화

전자기학에서 복잡한 최적화 문제를 해결하기 위해 통계학, 생물학, 열역학의 기본원리를 통합한 GES(Global Evolution Strategy) 방법을 제안한다. 파를 개념의 최적화 기법중 하나로 생물학에서 자연의 환경에 따라 진화해가는, 즉 생명체 진화과정을 모사한 유전학적 방법^[5]과 열역학에서 재료의 구조가 안정화 되어가는 과정을 모사한 Simulated Annealing 을 결합한 것이다. GES의 흐름은 모든 반복에서 생산(Generation), 변이(Mutation), 조정(Tempering) 3가지 단순한 단계를 되풀이 한다. 생산은 생명체의 결합으로 새로운 세대를 생산하는 부모세대와 2세대가 발생하여 설계변수로 사용하고, 변이는 정규분포에서 발생하는 구간 (-1,1) 사이의 난수에 의해 발생하는 설계변수로 설계변수의 함수값에 따라 선택, 생존, 죽음으로 구분된다. 조정은 부모세대의 설계변수가 변이할 수 있는 변화 가능폭으로 변화 가능폭은 현재세대로부터 이전 10세대 동안 부모세대가 새롭게 바뀐 횟수를 계산하여 변화 가능폭을 조정한다.

본 프로그램에서 최적화 변수로는 선형소자 길이, 반경, 소자 사이의 간격으로 구성되고, 목적함수로 모멘트법을 사용하여 구한 안테나의 최대이득을 사용하였다. 그림 2는 최적화 알고리즘을 Block-Diagram으로 표시한 것이다.

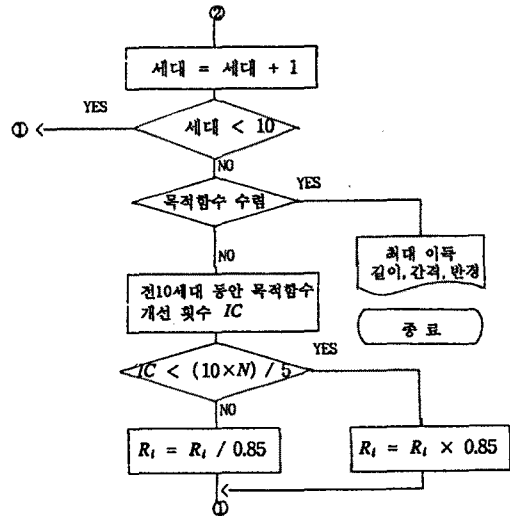


Fig. 2 Flowchart of optimization

III. 사례 연구

본 논문에서는 반사기, 에너지원, 방향기로 구성된 6개의 선형소자로 구성된 야기-우다 안테나를 최적 설계하였다.

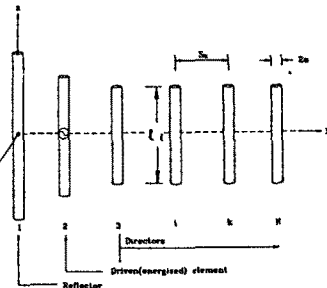


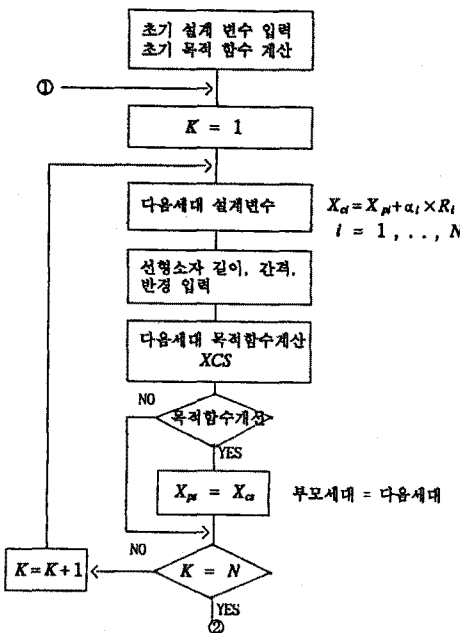
Fig. 3 Yagi-Uda antenna configuration

에너지원 길이 $0.45 \lambda \leq l_2 \leq 0.49 \lambda$
 방향기 길이 $0.40 \lambda \leq l_1 \leq 0.45 \lambda$
 반사기 길이 $l_2 \leq l_1 \leq 0.49 \lambda$
 선형소자 간격 $0.3 \lambda \leq S_{12} \leq 0.4 \lambda \quad S_{12} \leq S_{23}$

그림 3 에서 θ 는 고도 ϕ 는 방위각이고 l_1 는 선형소자의 길이 S_{12} 는 선형소자 i 와 선형소자 k 사이의 간격이고 a 는 선형소자의 반경을 나타낸다.

1. 6개소자 Yagi-Uda 안테나 최적화 및 결과 비교

본 논문에서는 선형소자의 길이, 반경, 선형소자 사이의 간격을 동시에 변수로하여 최대 이득을 목적함수로 사용했다. - 은 기존에 발표된 D.K. Cheng 과 C.A.Chen 의 최적화이고, + 는 본 논문에서 최적화한 결과이다. 그림 4(a)는 주파수에 따른 이득을 비교한 것으로 그림에서 나타나듯 사용 가능한 주파수 대역폭 (3dB Bandwidth)이 기존에 발표된 자료보다 본 논문이 제안한 자료가 더 넓게 됨을 비교할 수 있다. 그림 4(b)는 최적화된 안테나 패턴을 정규화하여 비교한 것으로 고도(θ)= 90°에서 방위각(ϕ)를 0°에서 360°까지 변화시킨 경우이다. 그림 5에서 - 은 선형소자 길이, 선형소자 사이의 간격을 동시에 최적화한 자료이고 + 는 선형소자 길이, 사이의 간격 및 반경을 동시에 최적화한 자료이다. 사용 가능한 주파수 대역폭에서 반경을 고려한 것과 고려하지 않은 것의 차이는 거의 없다.



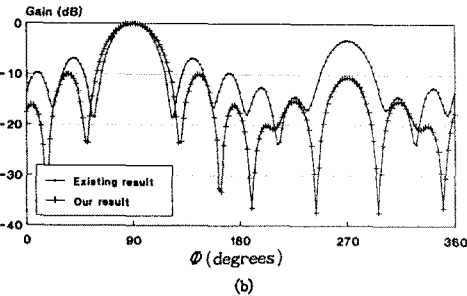
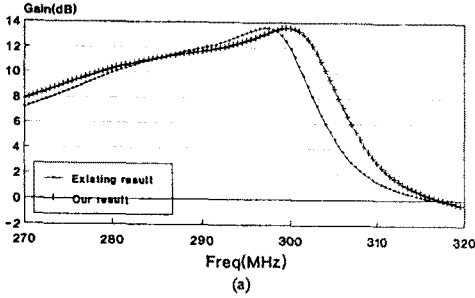


Fig. 4 Comparison of gain with Cheng's data (a) Versus frequency (b) Versus azimuth angle (Φ)

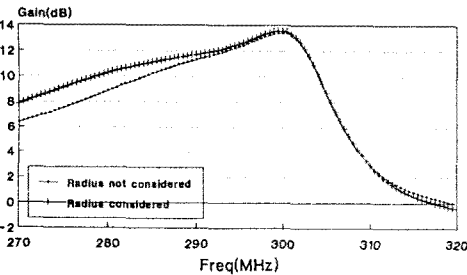


Fig. 5 Comparison of gain with a frequency

표 1은 야기-우다 안테나 최적화에 따른 선형소자 설계자료를 비교한 것으로 Case 1은 D.K.Cheng 과 C.A.Chen의 최적화 자료이고 Case 2는 선형소자 길이 선형소자 사이의 간격 및 반경을 동시에 최적화한 자료이고, Case 3은 선형소자 길이와 사이의 간격을 동시에 최적화한 자료이다. Case 2와 Case 3의 경우 반경을 고려한 것과 고려하지 않은 것의 이득 차이가 적은 것을 비교할 수 있다. Case 4는 선형소자의 길이가 1.5λ 인 경우 최적화한 자료이다.

Table 1. Comparison of optimized dimensions with Cheng's data

Length	l_1/λ	l_2/λ	l_3/λ	l_4/λ	l_5/λ	l_6/λ	Gain (dB)
Space	S_{21}/λ	S_{32}/λ	S_{43}/λ	S_{54}/λ	S_{65}/λ		
Radius	a_1/λ	a_2/λ	a_3/λ	a_4/λ	a_5/λ	a_6/λ	
Case 1	0.472	0.452	0.436	0.430	0.434	0.430	11.97
	0.250	0.289	0.406	0.323	0.422		
	0.0033	0.0033	0.0033	0.0033	0.0033	0.0033	
Case 2	0.477	0.453	0.432	0.414	0.429	0.422	13.58
	0.256	0.290	0.422	0.317	0.407		
	0.0038	0.0036	0.0031	0.0047	0.0036	0.0037	
Case 3	0.466	0.454	0.432	0.425	0.430	0.427	13.43
	0.256	0.290	0.422	0.317	0.407		
	0.0033	0.0033	0.0033	0.0033	0.0033	0.0033	
Case 4	1.50	1.46	1.44	1.44	1.45	1.44	14.96
	0.175	0.32	0.43	0.285	0.455		
	0.0033	0.0033	0.0033	0.0033	0.0033	0.0033	

2. 야기-우다 안테나 최적화 결과

표 2는 선형소자의 반경 $a = 0.003369\lambda$ 로 하고 선형소자의 길이 및 간격을 동시에 최적화한 자료로 선형소자수(방향기)가 증가 할 수록 이득이 높아짐을 비교할 수 있다. 해석결과에서 안테나의 선형소자 수에 따른 주파수, 고도 및 방위각에 따른 이득은 선형소자수(방향기)가 증가 할 수록 빔폭(Beamwidth)이 감소하고 사용가능 주파수 대역폭이 넓어짐을 볼 수 있었다.

Table 2. Optimized dimensions of Yagi-Uda arrays ($a=0.003369\lambda$)

element 수	4	5	6	7	8	9
Gain(dB)	11.06	12.46	13.31	14.54	14.39	15.01
l_1/λ	0.4633	0.4789	0.4672	0.4900	0.4889	0.4881
l_2/λ	0.4701	0.4902	0.4500	0.4927	0.5089	0.5050
l_3/λ	0.4284	0.4240	0.4315	0.4369	0.4349	0.4339
l_4/λ	0.4286	0.4225	0.4241	0.4281	0.4296	0.4366
l_5/λ		0.4250	0.4312	0.4115	0.4133	0.4145
l_6/λ			0.4338	0.4185	0.4168	0.3903
l_7/λ				0.4193	0.4101	0.4131
l_8/λ					0.4184	0.4180
l_9/λ						0.4198
(S_{21}/λ)	0.2468	0.2513	0.2487	0.1688	0.1149	0.1065
(S_{32}/λ)	0.2837	0.2971	0.2860	0.2931	0.3182	0.3437
(S_{43}/λ)	0.3990	0.4058	0.4031	0.3234	0.3309	0.2841
(S_{54}/λ)		0.3326	0.3306	0.4742	0.3787	0.4425
(S_{65}/λ)			0.3286	0.3915	0.3896	0.3754
(S_{76}/λ)				0.4069	0.3102	0.3470
(S_{87}/λ)					0.3418	0.2779
(S_{98}/λ)						0.3808

IV. 결 론

본 논문에서는 6개의 선형소자로 이루어진 야기-우다 안테나를 최적화 설계하였다. 최적화 방법으로는 자연의 환경에 따라 진화해 가는 과정을 모사한 유전학적 방법과 재료의구조가 안정화되어 가는 과정을 모사한 Simulated Annealing을 결합한 확률 개념의 Evolution Strategy를 사용하였다. 최적화 변수로는 선형소자의 길이, 반경 및 소자 사이의 간격을 사용하고, 목적 함수로는 모멘트 방법을 사용하여 구한 안테나의 최대 이득을 사용하였다. 기존에 D.K.Cheng & C.A.Chen 등이 제시한 Perturbation 최적화 방법에 비하여 이득이 1.61 dB 증가하였다.

참고문헌

- [1] S. Uda, "Wireless beam of short electric waves," J. IEE (Japan), pp.273-282, March 1926, and pp.1209-1219, November 1927.
- [2] H. Yagi, "Beam transmission of ultra short waves," Proc. IRE, vol. 16, pp. 715-741, June 1928.
- [3] D.K.Cheng and C. A. Chen, "Optimum element spacings for Yagi-Uda arrays," IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. AP-21, pp.615-623, Sept. 1973.
- [4] C.A.Chen and D.K.Cheng, "Optimum element lengths for Yagi-Uda arrays," IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. AP-23, NO.1, Jan. 1975.
- [5] K.Preis and A.Ziegler, "Optimal Design of Electromagnetic Devices with Evolution Strategies," in 3DMAG, International Symposium on 3-D Electromagnetic Fields Okayama, Japan, Sept. 1989 proceedings, pp. 119-122. "COMPEL, Vol.9 Supp. A", 1990.
- [6] J. Simkin, C. W. Trowbridge, "Optimizing Electromagnetic Devices Combining Direct Search Methods With Simulated Annealing," Vector Fields Ltd., 24 Bankside Kidlington, Oxford OX5 1JE, UK.