

무선전력전송용 렉테나 최적 설계를 위한 PSO 알고리즘 분석 연구

論 文
11-2-2

A study on analysis of particle swarm optimization algorithm for the optimum design of rectenna for wireless power transmission

김 군 태, 남 영 빈, 오 승 훈, 이 정 혁, 강 성 인, 김 형 석*
Koon-Tae Kim, Yeong-Bin Nam, Seung-Hun Oh, Jung-Hyeok Lee,
Seong-In Kang, and Hyeong-Seok Kim

Abstract

In this paper, the particle swarm optimization (PSO) algorithm is adopted to design a modified ring-slot type patch rectenna with a resonance frequency of 2.45GHz. In order to accomplish minimization of dimensions and circular polarization (CP) and harmonic suppression, axial direction slits and side-cuts are added to the patch of the ring. The PSO manipulated this kind of multi-dimensional problem very well, and as a result, the designed rectenna shows a desirable performance of return loss of 21.36dB and axial ratio of 2.92dB at the frequency of 2.45GHz with compact sizing.

Keywords : Particle Swarm Optimization, Rectenna, Wireless Power Transmission, Optimal Design, Circular Polarization

I. 서 론

최근 rectenna (rectifying antenna)는 무선 센서 네트워크 노드 및 기타 저전력 소비 통신 장치에 전력 및 무선 통신 서비스를 제공하는데 사용되고 있다. 고주파 응용 기기에 적용하기 위해서는 인쇄형 패치 안테나 형태의 rectenna 설계가 필요하다. 패치형의 rectenna 설계는 [1]-[3]과 같이 많이 연구되고 있다. 그리고 가장 최근에 연구된 Takhedmit 는 링-슬롯형 구조를 사용하여 필터없이 안테나의 뒷면에 정류회로를 삽입하여 설계하여 공간을 효율적으로 사용하였다 [4].

rectenna의 크기는 작게 설계가 되었지만, 선제 네트워크 시스템은 제한된 공간에 고성능의 부품을 요구한다. 따라서 rectenna의 크기는 높은 효율성을 유지하면서도 크기를 축소해야한다.

그리고 안테나 설계에서 전방향성 방사 특성과 원치 않는 전력의 재방사를 억제하기 위해서는 편파 특성과 고조파 억제는 여전히 요구되고 있다.

본 논문에서는 소형화 rectenna용 안테나의 최적설계 과정을 나타내었다. 본 논문은 크게 두 부분으로 구성되어 있다. 첫 번째 부분은 안테나의 구조 설계 및 주요 설계변수의 선정이다. 설계된 안테나는 축방향의 슬릿과 사이드의 컷 크기는 고조파 방사를 억제하고 원형 편파를 형성한다. 두 번째 부분은 각 설계변수의 선택 수의 변화와 PSO 알고리즘의 particle 개수에 따른 목적함수의 수렴도 변화 분석이다.

PSO 알고리즘은 dimension과 particle의 개수 선정이 매우 중요한 알고리즘이다. PSO 알고리즘은 multi-dimension 문제 해결에 강력한 도구로 알려져 있어 이를 이용하여 최적 설계를 수행하였다. PSO 알고리즘은 최적화 수렴 특성이 SA (simulated annealing)과 GA (genetic algorithm)보다 우수한 것을 알려져 있다[5].

본 논문에서는 센서네트워크 신호를 전력 공급원으로

접수일자 : 2012년 04월 07일
심사일자 : 2012년 05월 20일
최종완료 : 2012년 06월 20일
*교신저자, E-mail : kimcaf2@cau.ac.kr

로 하여 직류전원을 얻기 위한 무선전력전송용 렉테나를 설계하였다. Multi-dimension에 대한 성능을 시험하기 위해서 다양한 dimension과 particle에 대해서 비교 분석을 수행하였다.

II. 본 론

1. Rectenna용 안테나 설계

최근에 사용되는 센서들의 크기가 매우 소형화되고 있다. 이에 센서에 사용될 렉테나의 크기도 매우 중요한 설계 요소가 된다. 이에 본 논문에서는 안테나의 소형화 기술을 이용하여 설계하였다.

첫 번째로 링 슬롯을 이용하여 안테나를 소형화하였다. 링 슬롯 안테나는 TM₁₁ 동작하는데 있어 원주의 1/2 길이로 반파장을 얻을 수 있다. 이는 원 지름의 1/2 길이로 동작하는 원형 패치 안테나에 비해 소형화 할 수 있다. 그림 1은 기본 원형 패치 안테나와 링-슬롯 안테나의 공진 길이를 비교하여 보여주고 있다.

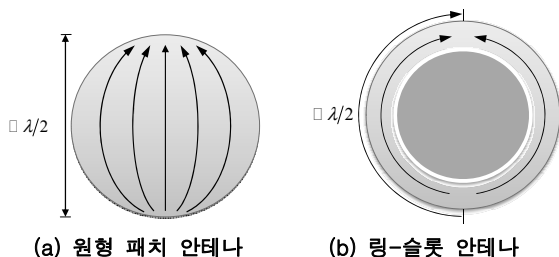


그림 1. TM₁₁ 모드로 동작하는 안테나의 공진 길이

링 슬롯 안테나는 원주의 길이에 의해서 동작하기 때문에 원주의 길이를 늘이기 위해서 원형 패치에 슬릿을 삽입하여 원주의 길이가 증가하도록 설계하였다.

본 논문에서 설계된 안테나는 단일 급전 방식을 이용하였다. 따라서 원형 패치가 45도 기울어진 상

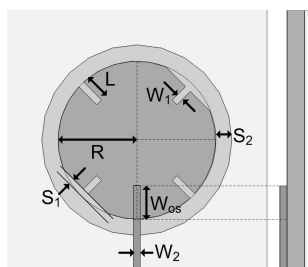


그림 2. rectenna용 안테나의 초기형상 및 설계변수

태로 설계 되었으며 타원형을 만들기 위해서 일부를 cutting 하여 초기 모델을 설계하였다. 그림 2는 초기 설계 모델의 모습이다. 뒷면에서 급전된 신호가 via를 통해 원형 패치에 연결되어 있다[6-7].

2. PSO (Particle Swarm Optimization)

PSO는 새, 벌, 개미 등 무리의 움직임에 대한 연구로부터 발생하였다. 무리가 먹이를 찾아가는 과정이나 집으로 돌아오는 과정에서 각 개체들은 자신의 정보를 무리 전체에게 정보 공유를 한다는 가설과 무리 내의 개체가 지금까지 자신의 경험과 무리에서 공유되고 있는 정보를 기초로 하여 행동한다는 점을 최적화 과정에 적용한 기법이라고 할 수 있다.

PSO에서 각 particle은 각 개별이 지금까지의 탐색 과정 중에서 최적의 해를 기억하고 있고 집단에서 발견한 해 중에서 최적의 목적함수 값 F와 그 해의 위치 벡터 G_{best} 정보를 고유하게 된다.

PSO에서 swarm은 n개의 particle을 가지게 되며 주어진 문제의 해가 된다. 각 particle은 m차원 실수 벡터로 구성된다. 설계에서는 m차원은 m개의 설계 변수가 된다. 따라서 각 설계 변수는 주어진 문제의 차원을 나타낸다.

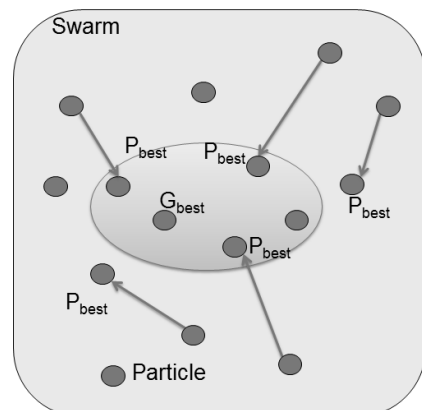


그림 3. PSO 알고리즘 구상도

PSO 알고리즘은 다음과 같은 과정으로 최적화를 수행한다[8].

1) Initialization : n개의 particle을 탐색 공간 내에서 랜덤하게 생성한다. 이들은 초기 swarm이 된다. 마찬가지로 초기 particle velocity를 랜덤하게 생성한다. 초기 swarm의 각 particle은 목적함수를 이용하여 평가되고, 이들 모두는 P_{best}로 설정한다. 초기 particle 중 최적의 값은 다시 G_{best}

로 선정된다.

2) Inertia weight & Velocity updating : 관성하중 값을 계산하고, 식 (1)을 이용하여 j번째 particle velocity를 계산한다. 제한조건을 확인한다.

$$v_{jk}(t+1) = w(t) \cdot v_{jk}(t) + c_1 \cdot r_1 \cdot (pbest_{jk}(t) - x_{jk}(t)) + c_2 \cdot r_2 \cdot (gbest_k(t) - x_{jk}(t)) \quad (1)$$

여기서 w 는 관성하중을 나타낸다. PSO의 인지성은 그자신의 생각과 메모리를 바탕으로 velocity를 조절하며, 사회성은 지식의 사회적 심리적응을 바탕으로 velocity를 조절한다. c_1 과 c_2 는 각 particle이 P_{best} 와 G_{best} 로 향하는 확률적인 가속의 가중치를 표현한다. 이들의 낮은 값은 목적지가 아닌 곳을 떠돌게 만든다. 반면에, 높은 값은 목적지를 지나치거나 갑작스런 방향전환을 유도한다. 기존에 많은 실험들은 이들 값을 1.49로 설정하였다.

3) Position updating : 식 (2)에 의해 particle의 위치정보는 조절된다.

$$x_{jk}(t) = v_{jk}(t) + x_{jk}(t-1) \quad (2)$$

$$x_k^{\min} \leq x_{jk}(t) \leq x_k^{\max}$$

4) Individual & Global best updating : 새로운 위치정보를 가진 particle들은 목적함수에 의해 평가된다. 각 particle의 적합도는 이전 P_{best} 의 적합도와 비교되며 P_{best} 를 재설정한다. P_{best} 의 particle 중 최적 해를 가지는 particle의 적합도와 이전 G_{best} 의 적합도를 비교하여 최적 위치정보를 가진 particle을 G_{best} 로 재설정한다.

5) Stopping criteria: 종료조건을 만족하면 탐색 과정을 종료하고, 그렇지 않으면 Step 2부터 반복한다.

위의 5가지 단계를 바탕으로 알고리즘을 구현하였다. 구현된 알고리즘은 Visual Basic으로 작성하고 상용 해석프로그램과 연동이 가능하도록 엑셀을 이용하였다.

3. PSO알고리즘의 최적설계 성능 비교

각 설계변수는 안테나 설계 성능에 큰 영향을 미칠 수 있기 때문에 설계변수의 선택은 매우 중요한 과정이다. 렉테나용 안테나의 성능에 영향을 줄 수 있는 모든 설계변수를 테스트 하였다. 그림 2에 모든 설계 변수를 나타내었다.

선택된 설계변수는 원의 반경에서 급전지점까

지의 거리(W_{os}), 슬릿의 길이(L), 원형 패치의 반지름(R), 사이드 커팅의 길이(S_1), 링-슬롯의 간격(S_2), 슬릿의 폭(W_1), 급전선의 폭(W_2)등이 각각 있다.

여러 설계변수에 의한 안테나 성능변화를 그림 4에 나타내었다. 모든 설계변수가 안테나의 성능에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. 따라서 목적에 알맞은 안테나 설계를 위해서는 최적화 기법이 필요하다.

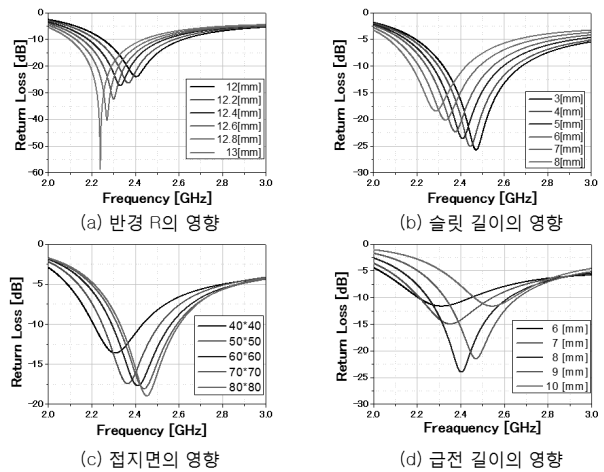


그림 4. 설계변수에 의한 영향

Fig. 4. The effect of design variables

서두에서 언급했듯이 PSO는 multi-dimension 문제 해결에 매우 강력한 솔루션으로 알려져 있다. 다양한 설계변수를 이용하여 PSO의 dimension의 변화와 particle의 변화에 따른 영향을 비교 분석하였다.

본 논문에서 안테나의 공진주파수를 주요 설계 목표로 하였다. 식 3은 공진주파수를 바탕으로 구성한 설계 목적함수이다.

$$\text{Minimize} : F = (f_o - f_i)^2 \quad (3)$$

$$\text{Subject to} : S_{11} \leq -20dB$$

여기서 f_o 는 목표 공진주파수, f_i 는 각 iteration에서의 공진주파수를 나타낸다. 그리고 설계목적 공진주파수 f_o 는 2.45GHz로 설정하였다. 제한 조건으로 공진주파수에 $-20dB$ 이하의 반사손실이 갖도록 설정하였다.

PSO의 dimension은 5개 일 경우와 7개의 경우로 나누어 실험하였으며 particle의 개수는 10개와 15개로 나누어서 실시하였다. 그림 5는 각 경우의 대한 목적함수의 수렴도를 비교하고 있다.

그림 5의 결과를 보면 5개 설계변수와 10개의 par-

title을 사용했을 경우가 가장 수렴이 늦게 되었으며 7개의 변수와 15개의 particle을 사용했을 경우가 가장 빠르게 수렴되었다. 또한 같은 설계변수에서 particle의 개수가 늘어날수록 빠르게 수렴하며 같은 particle의 개수에서는 설계변수의 수가 늘어날수록 빠르게 수렴하는 것을 확인할 수 있었다. 위의 결과를 보듯이 PSO알고리즘은 multi-dimension 문제해결에 매우 강력한 솔루션인 것을 확인할 수 있다.

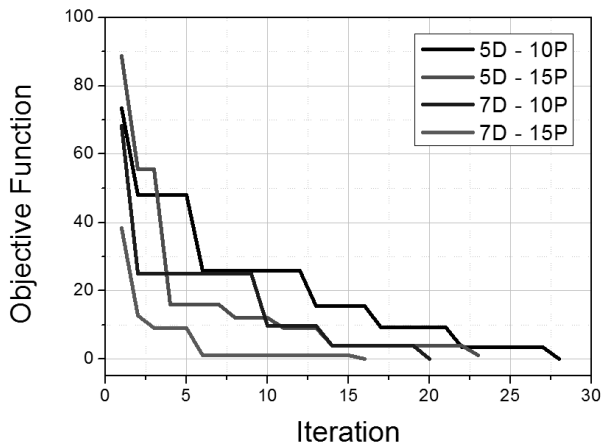


그림 5. dimension과 particle에 따른 목적함수의 변화
Fig. 5. Variation of the objective function by dimension and particles

III. 결 론

본 논문에서는 저전력 센서 네트워크 시스템용 rectenna의 최적 설계 연구를 수행하였다. 기존의 슬롯형 패치안테나에 축형 슬릿과 사이드 컷을 추가하여 원형 편파 안테나를 설계하였다. 설계된 rectenna용 안테나는 전체 크기가 소형화 되었으며 CP특성을 갖고 고조파 억제 특성을 나타낸다.

Dimension과 particle의 변화에 따른 목적함수의 수렴도를 비교 분석하였다. Dimension이 클수록 particle의 개수가 늘어날수록 더 빠르게 수렴하는 것을 확인하였으며 PSO를 이용한 최적설계를 수행할 때는 많은 설계변수를 선정하고 다수의 particle을 이용하여 최적 설계해야 한다는 사실을 알 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2012007758).

[참고 문헌]

- [1] M. Ali, G. Yang, and R. Dougal, "Miniature circularly polarized rectenna with reduced out-of-band harmonics," *IEEE Antenna and Wireless Propagation Letters*, vol. 5, no. 1, pp. 107-110, 2006.
- [2] Y. J. Ren and K. Chang, "5.8-GHz circularly polarized dual-diode rectenna and rectenna array for microwave power transmission," *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques*, vol. 54, no. 4, pp. 1495-1502, 2006.
- [3] F. J. Huang, C. M. Lee, C. L. Chang, L. K. Chen, T. C. Yo, and C. H. Luo, "Rectenna application of miniaturized implantable antenna design for triple-band biotelemetry communication," *IEEE Transaction on Antenna and Propagation*, vol. 59, no. 7, pp. 2646-2653, July, 2011.
- [4] H. Takhemit, L. Cirio, S. Bellal, D. Delcroix, and O. Picon, "Compact and efficient 2.45GHz circularly polarized shorted ring-slot rectenna," *Electronics Letters*, vol. 48, no. 5, pp. 253-254, 2012.
- [5] J. H. Seo, C. H. Im, S. Y. Kwak, C. G. Lee, and H. K. Jung, "An improved particle swarm optimization algorithm mimicking territorial dispute between groups for multimodal function optimization problems," *IEEE Transaction on Magnetics*, vol. 44, no. 6, pp. 1046-1049, 2008.
- [6] K. L. Wong and J. Y. Wu, "Single-feed small circularly polarized square microstrip antenna," *Electronics Letters*, vol. 33, no. 22, pp. 1833-1834, 1997.
- [7] W. S. Chen, C. K. Wu, and K. L. Wong, "Novel compact circularly polarized square microstrip antenna," *IEEE Transaction on Antenna and Propagation*, vol. 49, no. 3, pp. 340-342, 2001.
- [8] J. Robinson and Y. Rahmat-Samii, "Particle swarm optimization in electromagnetics," *IEEE Transaction on Antenna and Propagation*, vol. 52, no. 2, pp. 397-407, 2004.

Biography



김 군 태

2008년 서경대학교 정보통신과 졸업
2010년 중앙대학교 전자전기공학부(공학석사)
2012년 중앙대학교 전자전기공학부(박사수료)
2012년~현재 중앙대학교 전자전기공학부 박사
과정

<관심분야> 무선전력전송, 무선충전, 초고주파 부품 소자 설계,
최적화 알고리즘, Antenna

<e-mail> andorr@naver.com



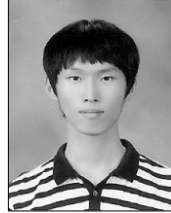
남 영 빈

2004년 중앙대학교 전자전기공학부 입학
2012년~현재 중앙대학교 전자전기공학부 재학
<관심분야> 무선전력전송, 안테나
<e-mail>



오 승 훈

2006년 중앙대학교 전자전기공학과 입학
2012년~현재 중앙대학교 전자전기공학부 재학
<관심분야> 초고주파 부품 설계, 안테나 설계
<e-mail> trydent0@naver.com



이 정 혁

2010년 동양미래대학교 정보전자과 졸업
2011년~현재 중앙대학교 전자전기공학부
<관심분야> 최적화 알고리즘, SDR,
임베디드 시스템
<e-mail> megaskill@naver.com



강 성 인

2003년 창원대학교 전기공학(메카트로닉스공
학)과 졸업
2010년 중앙대학교 정보통신공학과(공학석사)
2012년~현재 중앙대학교 전자전기공학부 박
사과정

2011년~2012년 한국건설기술연구원

<관심분야> 무선충전, 초고주파 부품 소자 설계, 분산전원

<e-mail> sikang@kict.re.kr



김 형 석

1985년 서울대학교 전기공학과 졸업
1987년 서울대학교 전기공학과(공학석사)
1990년 서울대학교 전기공학과(공학박사)
1990년 ~ 2002년 순천향대학교 정보기술공학
부 부교수

1997년 ~ 1998년 R.P.I 미국 방문교수

2002년~현재 중앙대학교 전자전기공학부 교수

<관심분야> 전자장 및 수치해석, RF & 마이크로웨이브 소자
해석 및 설계

<e-mail> kimcaf@cau.ac.kr