J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea, 30(1)
pp.17~22, February, 2017
https://doi.org/10.7734/COSEIK.2017.30.1.17

pISSN 1229-3059 eISSN 2287-2302
Computational Structural
Engineering Institute of Korea

패치안테나 성능 향상을 위한 페이즈필드 설계법 기반의 형상 설계

이 상 엽[1] · 신 현 도[1] · 유 정 훈[2†]

[1]연세대학교 대학원 기계공학과, [2]연세대학교 기계공학과

Structural Design based on the Phase Field Design Method to Enhance the Patch Antenna Performance

Sangyeub Lee[1], Hyundo Shin[1] and Jeonghoon Yoo[2†]

[1]*Graduate school of Mechanical Engineering, Yonsei Univ., Seoul, 03722, Korea*
[2]*Department of Mechanical Engineering, Yonsei Univ., Seoul, 03722, Korea*

Abstract

In this study, we designed the metallic reception part of a patch antenna using the phase field design method. The design object function is formulated with the S-parameter value which represent the return loss so that it is targeted to maximize radiation efficiency at a target frequency. The initial model of a patch antenna was designed via the ordinary theory based approach and its performance was enhanced by changing the structural configuration of the metallic part using the phase field design method combined with the double well potential functions. The final shape was proposed by removing the gray scale area along the structural boundary by employing a cut-off method. The proposed shape shows that the radiation efficiency at target frequency is significantly improved compared with the initial patch shape. The finite element analysis and optimization precess was performed using the commercial package COMSOL and Matlab programming.

Keywords : *metallic structure design, patch antenna, phase field design method*

1. 서 론

마이크로파(microwave) 대역에 적용되는 패치안테나(patch antenna)는 작고 가벼우며 대량 생산 시 생산비가 적게 드는 장점을 가지고 있다. 또한 집적·배열·편파가 쉬워서 널리 사용되고 있다(Stutzman *et al.*, 2012). 일반적으로 많이 사용되는 사각 형상을 가진 패치안테나는 간단한 형상을 가지고 있어 대량 생산에 적합하다는 장점이 있으나, 다른 형태의 안테나에 비하여 상대적으로 낮은 방사 효율과 좁은 대역폭을 지니고 있다. 이를 극복하기 위하여 지금까지 패치안테나에 관련된 많은 연구들이 대역폭의 향상에 초점이 맞춰져 있었다.

패치안테나는 공진형 안테나의 일종이기 때문에 패치 형상의 변화는 패치안테나의 성능을 향상시키는데 효과적으로 적용될 수 있다. 이를 위하여 여러 가지 구조설계 기법이 안테나의 형상 설계에 적용되어 왔다. 유전 알고리즘을 이용한 설계 방법이 그 적용의 편의성으로 널리 사용되어 왔으며(Chelouah *et al.*, 2000, Song *et al.*, 2014), 패치안테나의 유전체 기판 설계에 밀도법(density method) 기반의 위상최적화 방법이 적용된 바 있다(Uchida *et al.*, 2009). 최근 구조 최적화 설계에 활발히 적용되고 있는 페이즈필드 설계법은 전자기파를 이용한 구조 설계 분야로도 연구 분야를 확장하고 있다(Byun *et al.*, 2014, Lim *et al.*, 2014).

본 연구에서는 페이즈필드 설계법을 이용하여 목표 주파수에서의 패치안테나의 방사 효율을 향상시키는 구조를 제시하고자 하였다. 유한요소법을 이용한 해석과 최적화 과정은 상용패키지인 COMSOL과 Matlab 기반의 프로그래밍을 이용하여 수행되었다.

† Corresponding author:
Tel: +82-2-2123-2859; E-mail: yoojh@yonsei.ac.kr
Received October 17 2016; Revised December 12 2016;
Accepted January 2 2017
©2017 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

2. 설계 방법

2.1 페이즈필드 설계법 기반의 위상최적설계

페이즈필드 설계법에서는 서로 다른 두 가지 상(phase)을 갖는 설계 영역에서 페이즈필드 함수의 값을 계산하여 경계의 변화를 표현하는 방법이다. 이 설계 영역에서의 에너지 식은 다음과 같이 표시된다.

$$E(\phi) = \int_{\Omega} \left(\frac{1}{2}\tau|\nabla\phi^2| + \overline{F}(\phi, u(\phi)) \right) d\Omega \tag{1}$$

우변의 첫 번째 항은 가상의 경계에너지로서, τ는 확산계수(diffusion coefficient)이다. 확산계수는 두 상 사이의 변화를 조절함으로써 설계 형상의 복잡도를 조절할 수 있다. ϕ는 설계 변수인 페이즈필드 변수를 의미한다.

페이즈필드 설계법에서는 설계 변수 변화에 대한 목적함수의 민감도를 계산하고, 이를 다음과 같은 반응-확산(reaction-diffusion) 방정식에 대입하여 설계 변수의 갱신을 수행한다.

$$\frac{\partial\phi(x,t)}{\partial t} = \tau\nabla^2\phi(x,t) - \frac{\partial\overline{F}(\phi, S(\phi))}{\partial\phi} \tag{2}$$

여기서, $\overline{F}$는 Lagrange법을 이용하여 목적함수와 제약조건을 결합한 범함수(augmented lagrangian)이며, t는 가상의 시간을 의미한다. 최적화 과정은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 진행된다. 유한요소해석 및 민감도 계산에는 COMSOL 패키지를 사용하였고, 설계변수 갱신 및 반복 과정은 Matlab 프로그래밍을 이용하여 진행하였다.

본 연구에서는 범함수에 Double Well Potential(DWP) 함수를 도입한 형태의 페이즈필드 설계법을 사용함으로써

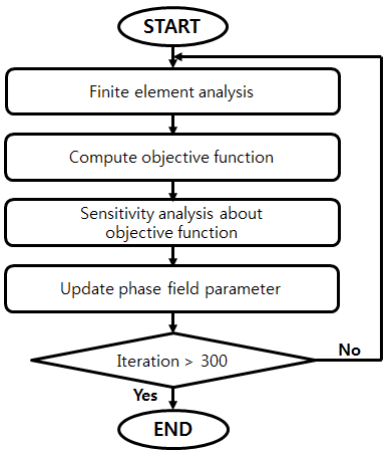


Fig. 1 Flowchart of the optimization procedure

설계 변수인 페이즈필드 변수 값이 두 상 사이의 경계에서만 이루어지도록 한다(Takejawa *et al.*, 2010). DWP 함수를 도입함에 따라 기존의 위상최적설계 결과에 비해 단순한 구조 형상의 결과를 도출할 수 있고, 설계 민감도 계산을 위한 파라미터 값들을 조절하여 설계 과정에서의 수렴도를 높일 수 있다(Choi *et al.*, 2011).

2.2 최적화 문제의 정식화

본 연구의 구조 설계에서는 목적 주파수에서의 방사효율을 최대화 하는 것이 목표로 한다. 일반적으로 방사 효율을 최대화 하는 것은 반사에 따른 손실을 최소화하여 안테나의 수신도를 향상시키는 것을 의미한다. 따라서 설계의 목적함수는 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$\text{Min.} \qquad \mathrm{F}(\phi, \mathrm{S}(\phi)) = 20\log\sqrt{1 - \frac{P_2(\phi)}{P_1}} \tag{3}$$

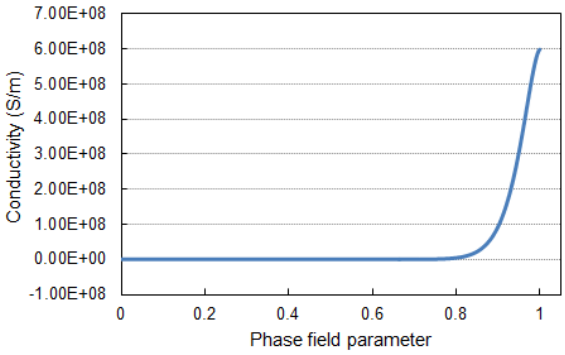
$$\textit{Subject to} \quad 0 \le \phi \le 1$$

식 (3)에서 F는 설계의 목적함수이다. S는 안테나에서 출력되는 S-파라미터로서, 반사손실의 절대값을 데시벨(dB) 스케일로 나타낸 것이다. P_1과 P_2은 각각 입력 전력과 출력 전력을 나타내며, 목표 주파수는 6GHz로 설정하였다. 또한 자유로운 형상 도출을 위해 설계 제한 조건인 부피 제한조건을 제외하였으며, 이에 따라 식 (2)에서의 범함수 $\overline{F}$는 F로 표시될 수 있다.

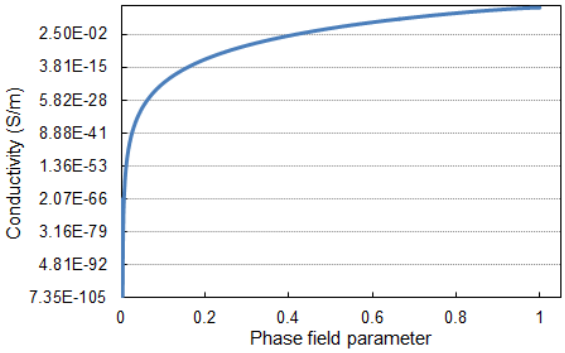
2.3 물성 정의

본 연구에서는 금속 영역에 대한 물성치로 전기전도도(electric conductivity)를 도입하였다. 마이크로파 대역에서의 이 값은 공기에서와 구리(copper)에서의 값이 각각 0, 10^7 S/m로써 큰 차이를 가진다. 일반적으로 사용되는 벌칙함수(penalization function) 기반의 설계 변수에 따른 물성치 정의를 도입하는 경우, 민감도 계산 과정에서의 큰 변동에 의하여 수렴도에 문제가 발생할 수 있다(Aage *et al.*, 2010). 본 연구에서는 마이크로파 대역에서의 금속 구조의 변동을 구현하기 위하여, 다음과 같은 sigmoid 함수의 기반의 물성치 정의를 도입하였다.

$$\sigma(\phi) = \sigma_1 + (\sigma_2 - \sigma_1)\left(1 + \frac{1-(\phi-\alpha)}{1-t_m}\right)\left(\left((\phi-\alpha)^2\right)^{\frac{1}{2}}\right)^{\frac{t_m}{1-t_m}} \tag{4}$$



(a) Normal scale plot



(b) Log scale plot

Fig. 2 Interpolation plots of the electric conductivity

여기서, σ_1과 σ_2는 각각 공기와 구리의 전기전도도이다. α값은 $\phi=1$일 때 $\sigma=\sigma_2$을 만족하도록 하는 조정값이고, t_m은 그래프의 기울기를 조절하는 값으로 0.95로 설정되었다. Fig. 2(a)은 설계변수 ϕ에 따른 물성치의 변화를 보여주고 있다. ϕ가 적은 값의 경우는 물성치의 변화가 거의 보이지 않으나, 전기전도도의 큰 변동값을 고려하면 Fig. 2(b)의 log-scale에서 나타낸 바와 같이 0.2이하의 적은 ϕ에서도 전도도의 변화가 큼을 확인할 수 있다. ϕ의 변화에 따른 전도도의 변화는 Matlab 프로그래밍을 이용하여 진행된다.

3. 설계 문제의 정의

3.1 해석 모델

안테나 초기 형상 $\Omega_{initial}$과 이를 포함한 확대된 설계영역 Ω_{design}의 설정은 Fig. 3과 같다. 해석 및 설계에 사용되는 기판영역 $\Omega_{substrate}$는 유전율(permittivity) 5.23을 갖고 높이는 0.8mm이다. 패치와 급전영역 Ω_{feed}는 구리로 구성되었고, 모델의 경계에는 Scattering boundary 조건을 적용하였다. 시뮬레이션에서 전력을 입력하는 방식은 lumped port로 설정하였다. 패치의 초기 형상의 폭 W와 길이 L은 다음의 이론적 근사식들을 이용하여 도출하였다.

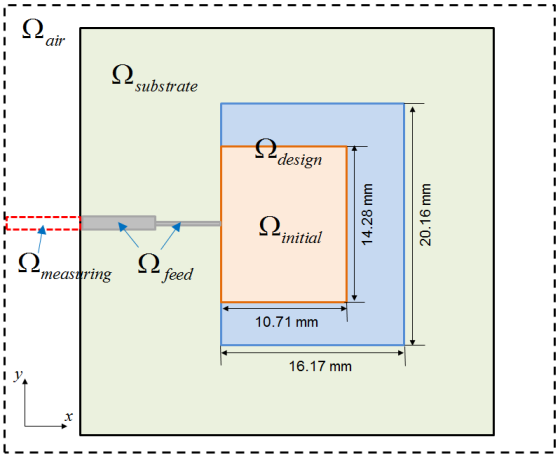


Fig. 3 Schematic of the initial model and the definition of the design domain

$$W=\frac{c}{2f_0\sqrt{\frac{\epsilon_R+1}{2}}} \tag{5}$$

$$L=\frac{c}{2f_0\sqrt{\epsilon_{eff}}}-0.824h\left(\frac{(\epsilon_{eff}+0.3)\left(\frac{W}{h}+0.264\right)}{(\epsilon_{eff}-0.258)\left(\frac{W}{h}+0.8\right)}\right) \tag{6}$$

위 식들에서 c, f_0, ϵ_R, h는 각각 빛의 속도, 목표 주파수, 기판의 유전율, 기판의 높이를 나타낸다. 유효유전율 ϵ_{eff}는 다음과 같이 계산된다.

$$\epsilon_{eff}=\frac{\epsilon_R+1}{2}+\frac{\epsilon_R-1}{2}\left[\frac{1}{\sqrt{1+12\left(\frac{h}{W}\right)}}\right] \tag{7}$$

설계영역은 형상의 자유도를 높이기 위하여, 초기 형상보다 넓게 설정하였다. 설계영역의 크기는 목표 주파수가 4GHz 일 때 이론적 근사식에 의한 계산 결과 값을 이용하였다(Matin *et al.*, 2010). 해석 모델의 이산화에는 mapped mesh를

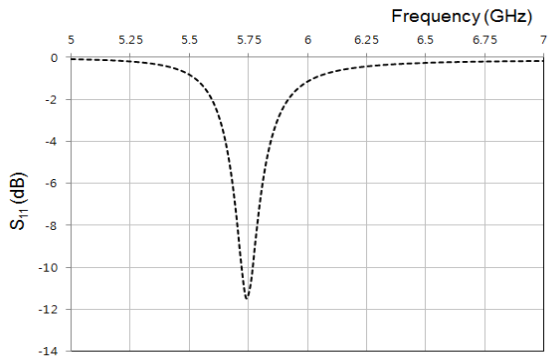


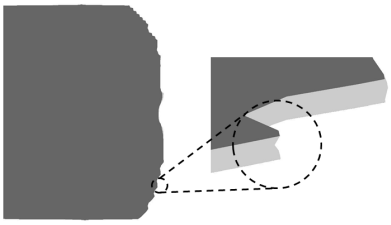
Fig. 4 Plot of the S_{11} parameter values for the initial patch antenna model

적용하였고, 설계 영역은 29,568개의 요소로 구성되었다. 해석에 따른 초기 형상의 S_{11} 파라미터의 그래프는 Fig. 4와 같다. 최소 S_{11}값은 5.75GHz에서 형성되며, 목표 주파수 6.0 GHz에서의 값은 -1.14dB로 상당히 큰 값을 보이고 있다.

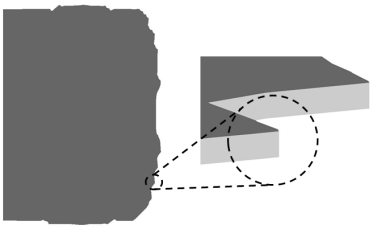
3.2 확산계수 정의

패치 안테나는 유전체 위에 얇은 구리 박막으로 구성된다. 제작 특성상 두께 방향에서의 복잡한 형상을 구현하는 것이 어려우므로, Fig. 3에 표시된 좌표계에서 두께 방향 z의 확산계수를 증가시켜서 이 방향으로의 형상 변화를 제한하였다 (Yamada *et al.*, 2010).

Fig. 5(a)는 식 (2)의 z방향의 확산계수 τ_z값의 변화에 따른 설계 결과이다. 패치안테나의 두께 방향 형상을 확인하기 위해, $\phi=0.5$에 대한 등위면(iso-surface)을 기준으로 형상을 나타내었다. 확산계수는 경계영역에 2~3개의 요소가 포함될 수 있는 크기로 정의되며, (a)와 (b)에서 x, y의 확산계수는 $\tau_x=\tau_y=100$으로 같고, z방향으로는 각각 0.1, 1,000으로 설정되었다. z방향의 확산계수 값을 x, y방향의 확산계수보다 크게 함으로써, 두께 방향에 대한 형상 변화가 최소화됨을 확인할 수 있다. 또한, z방향 확산계수의 영향으로 패치의 x, y방향 형상에도 영향을 미침을 알 수 있다. Fig. 5(c),(d)는 $\tau_z=1{,}000$으로 고정하고, $\tau_x=\tau_y$값이 100, 200, 400으로 변함에 따라 나타난 설계 결과이다. x, y방향 확산계수 값이 증가함에 따라 경계의 회색 밀도(gray scale) 영역이 확대되며, 수렴성이 감소함을 확인할 수 있다.



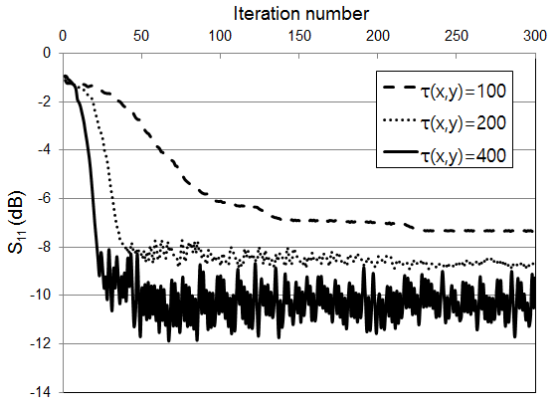
(a) $\tau_x=\tau_y=100$, $\tau_z=0.1$



(b) $\tau_x=\tau_y=100$, $\tau_z=1{,}000$

$\tau_x=\tau_y=100$ $\tau_x=\tau_y=200$ $\tau_x=\tau_y=400$

(c) Optimal configurations with various x, y diffusion coefficients



(d) Convergence graphs for various x, y diffusion coefficients

Fig. 5 Effects of diffusion coefficient value for patch structure design

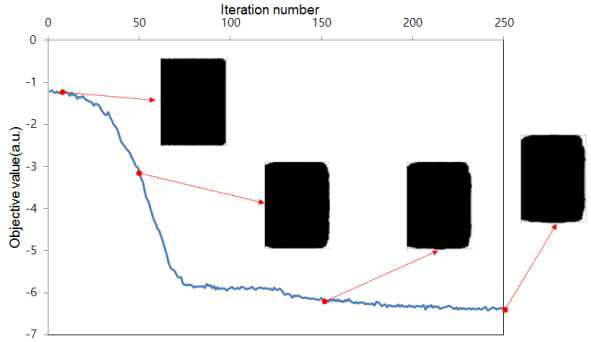
4. 최종 형상의 도출

4.1 구조설계 결과

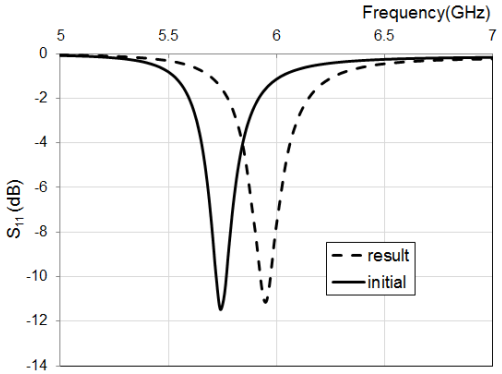
Fig. 6(a)는 페이즈필드 설계법을 이용한 설계 과정에서의 목적함수 값과 형상의 변화를 나타내고 있다. 반복횟수 50번부터 형상에는 큰 변화가 없지만, 목적함수 값이 계속해서 바뀌는 것을 볼 수 있다. 이는 고주파 영역의 패치안테나 설계에서 형상의 미세한 변화가 결과에 영향을 미치는 것을 보여준다. Fig. 6(b) 그래프는 초기형상과 최종 설계형상의 S파라미터 값을 나타낸다. 최소 S파라미터 값은 유사하나, 최적화 결과로 중심 주파수가 목적 주파수에 가깝게 이동한것을 확인할 수 있다. 이에 따라 목표 주파수인 6GHz에서의 S파라미터 값은 -1.44dB에서 -7.75dB로 감소하였다.

4.2 Cut-off 방법의 적용

제시된 설계 방법을 적용할 때 구조의 경계부분에서 발생하게 되는 회색 밀도를 제거하여 제작 가능한 등위면을 얻기 위하여 ϕ값에 따른 cut-off 방법을 적용하였다(Aage *et al.*, 2010). Fig. 7(a)는 구조설계의 결과에 대하여 0.1 간격으로 $\phi=0.1\sim0.9$로 cut-off한 결과에 해당하는 등위면을 도시한 것이다. cut-off 방법의 결과에 따른 형상에 대한 S_{11} 파라미터 그래프를 Fig.7(b)에 나타내었다. ϕ값이 증가함에 따라 중심 주파수가 고주파 대역으로 이동하는 것을 확인할 수 있다.

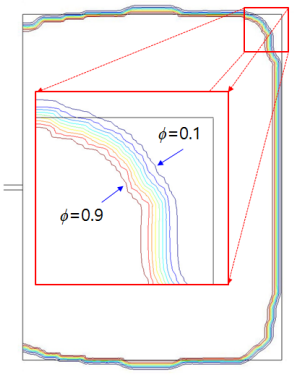


(a) Convergence graphs and variation of the patch shape

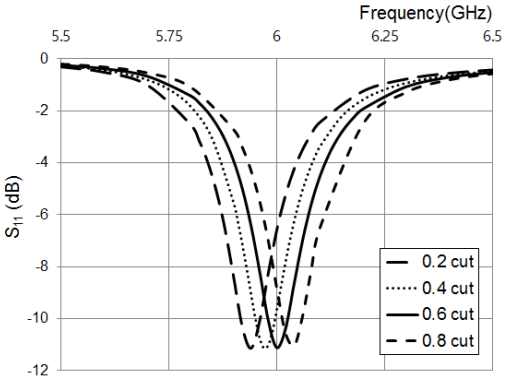


(b) Plot of the S_{11} parameter values for the initial and result models

Fig. 6 Results of patch structure design



(a) Iso-surface plot for various cut-off values



(b) S_{11} parameter plots for several cut-off models

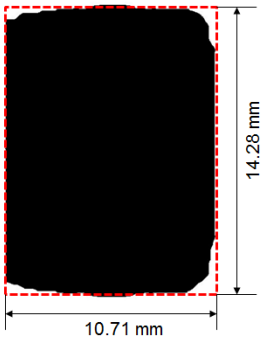
Fig. 7 Application results of the cut-off method

Fig.7(b) 분석결과 ϕ=0.6을 기준으로 형상을 결정하였을 때 중심 주파수가 목표 주파수에 일치하는 것을 확인하였으며, 이를 금속 패치의 최종 형상으로 선정하였다.

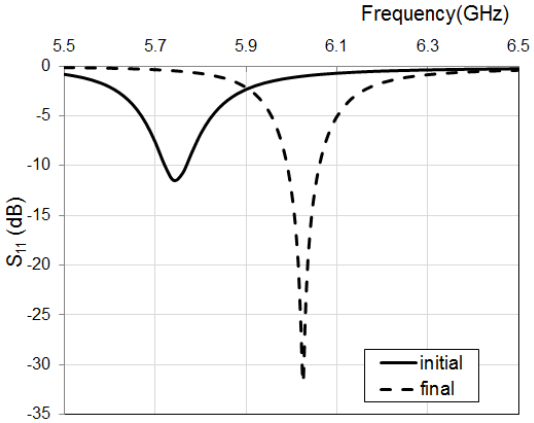
4.3 임피던스 정합 및 최종 형상의 도출

페이즈필드 설계법을 이용한 형상설계의 결과와 cut-off의 적용 결과, 패치부분의 형상이 바뀌고 이에 따라 안테나의 부하 임피던스가 변화한다. 따라서 변동된 임피던스에 맞게 다시 정합을 하는 과정이 필요하다. 정합 결과 급전 너비 1.95mm, 정합기 너비 0.21mm의 결과를 얻었다.

Fig. 8(a)는 위의 결과를 종합하여 도출된 패치 안테나 전체의 최종 형상을 나타내며 이에 따른 S_{11} 파라미터 그래프는 Fig. 8(b)에 나타내었다. 목표 주파수인 6GHz에서의 S파라미터 값은 -12.73dB로 나타나며, Fig. 3의 초기 모델의 해석과 비교할 때 약 11dB 만큼의 반사 손실의 감소를 확인할 수 있다.



(a) Proposed final patch shape



(b) S_{11} parameter plots for the final model

Fig. 8 Proposed final results

5. 결　　론

본 연구에서는 목표 주파수에서의 방사효율 증대를 목적으로 하여 패치안테나의 금속 패치 부분의 형상 설계를 수행하였다.

마이크로파 대역에서 설계변수의 변화에 따라 큰 차이를 나타내는 전기전도도의 값을 효과적으로 정의하고 민감도 계산을 원활하게 수행하기 위하여, sigmoid 함수 기반의 전도도를 정의하였다. 페이즈필드 설계법을 이용한 형상 설계와 cut-off 방법을 적용한 결과, 목표 주파수에 중심 주파수를 일치시키면서 초기 모델 대비 약 11dB의 반사손실을 줄이는 패치의 형상을 도출하였다.

패치안테나의 성능은 형상의 적은 변화에도 민감하게 좌우되므로, 위상최적화의 결과를 통하여 정확한 형상을 도출하기 위한 후처리 과정이 필요하다. 또한 광대역 및 다중 주파수 대역 패치안테나의 설계에 적용하기 위한 추가적인 연구가 요구된다.

후 기

이 논문은 2016년도 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었습니다(NRF-2016R1A2B4008501).

References

Aage, N., Mortensen, N.A., Sigmund, O. (2010) Topology Optimization of Metallic Devices for Microwave Applications, *Int. J. Numer. Meth. Eng.*, 83(2), pp.228~248.

Byun, S,. Lee, H.Y., Yoo, J. (2014) Systematic Approach of Nanoparticle Design to Enhance the Broadband Plasmonic Scattering Effect, *J. Appl. Phys.*, 115, pp.184302-1~184302-6.

Chelouah, R., Siarry, P. (2000) A Continuous Genetic Algorithm Designed for the Global Optimization of Multimodal Functions, *J. Heuristics*, 6(2), pp.191~213.

Choi, J.S., Yamada, T., Izui, K., Nishiwaki, S., Yoo, J. (2011) Topology Optimization using a Reaction-diffusion Equation, *Comput. Methods Appl. Mech. & Eng.*, 200(29), pp.2407~2420.

Lim, H., Yoo, J., Choi, J.S. (2014) Topological Nano-aperture Configuration by Structural Optimization based on the Phase Field Method, *Struct. Multi. Optim.*, 49, pp.209~224.

Matin, M.A., Sayeed, A.I. (2010) A Design Rule for Inset-fed Rectangular Microstrip Patch Antenna, *WSEAS Transactions on Communications*, 9(1), pp.63~72.

Song, S.M., Kim, C., Lee, H., Yoo, J. (2014) Patch Antenna Shape Design Using the Genetic Algorithm, *Trans. Soc. Inform. Stor. Sys.*, 10(2), pp.45~49.

Stutzman, W.L., Thiele, G.A. (2012) Antenna Theory and Design Wiley, *John Wiley & Sons*, New York.

Takezawa, A., Nishiwaki, S., Kitamura, M. (2010) Shape and Topology Optimization based on the Phase Field Method and Sensitivity Analysis, *J. Comput. Phys.*, 229, pp.2697~2718.

Uchida, N., Nishiwaki, S., Izui, K., Yoshimura, M., Nomura, T., Sato, K. (2009) Simultaneous Shape and Topology Optimization for the Design of Patch Antennas, *Proc. 3rd European Conf. Antennas Propag.*, pp.103~107.

Yamada, T., Izui, K., Nishiwaki, S., Takezawa, A. (2010) A Topology Optimization Method based on the Level Set Method Incorporating a Fictitious Interface Energy, *Comput. Methods Appl. Mech. & Eng.*, 199, pp.2876~2891.

요 지

본 연구에서는 페이즈필드 설계법에 기반한 형상최적설계를 통해 개선된 패치안테나 금속 패치 부분의 형상 설계를 진행하였다. 설계 목적은 패치 안테나의 목적 주파수에서의 방사 효율을 최대화 하는 것으로 설정하였고, 이에 따라 목적 함수는 반사손실을 나타내는 S-파라미터 값의 최소화로 정의하였다. 패치형상의 최적화 결과는 페이즈필드 설계법을 이용하여 도출하였고, 최적화 결과의 회색영역을 제거하기 위해서 컷오프 방법을 적용하였다. 더불어 쿼터 정합기의 길이 변화를 통해 성능 개선 과정을 진행하였다. 이를 통해 도출해낸 최종 형상에 대한 해석 결과, 목표 주파수에서의 S-파라미터 값이 -1.14dB에서 -12.73dB로 개선됨을 확인하였다.

핵심용어 : 금속구조설계, 패치안테나, 페이즈필드 설계법