

페이즈필드 설계법을 이용한 다중 유전체 구조의 RF 콜리메이터 설계

고 주 현¹ · 성 흥 경¹ · 김 한 민¹ · 박 진 우² · 유 정 훈^{3*}

¹연세대학교 대학원 기계공학과, ²국방과학연구소, ³연세대학교 기계공학부

RF Collimator Design having Multi-Dielectric Structure using the Phase Field Design Method

Joohyun Go¹, Hong Kyoung Seong¹, Hanmin Kim², Jinwoo Park² and Jeonghoon Yoo^{3*}

¹Graduate school of Mechanical Engineering, Yonsei Univ., Seoul, 03722, Korea

²Agency for Defense Development, Daejeon, 34186, Korea

³Department of Mechanical Engineering, Yonsei Univ., Seoul, 03722, Korea

Abstract

In this study, a collimator composed of multi-dielectric structures is designed using the phase field design method, a kind of topology optimization methods. It is also purposed to improve the mechanical-structural performance of a collimator by replacing previously used air regions with another dielectric material. Polypropylene and paraffin are selected as the dielectric materials for the design process taking manufacturability into account. The design objective is formulated by integrating the intensity of the electromagnetic field in the pre-determined target area to realize the collimating performance. The model for accurate numerical analysis was derived from the final result obtained from the design process through the simple cut-off method and it shows the improved performance of 105% compared with the free space wave propagation. For the designed model, the possibility of reverse transformation, the mechanical durability evaluation under the compression load, and the electromagnetic performance in the X-band range were also evaluated.

Keywords : multi-dielectric collimator, phase field design method, numerical verification

1. 서 론

RF(radio frequency) 또는 마이크로파(microwave) 대역의 콜리메이터(collimator)는 전자기파를 진행방향으로 평행하게 변환시키는 장치로 마이크로파 및 광학 기술을 이용한 다양한 장치에 적용되고 있다. 대부분의 전자기파는 원형 파동 형태로 발생되기 때문에 콜리메이터를 통해 거리에 따른 에너지 손실을 최소화하는 것이 가능하다. 이를 위하여 변환광학 이론(Pendry *et al.*, 2006; Leonhardt, 2006) 기반의 콜리메이터 관련 연구들이 진행되었으며(Kwon *et al.*, 2008; Jiang *et al.*, 2008) 이는 설계영역 내의 연속적인 유전율 분배를 통해 전자기장의 좌표계를 변환시켜 원하는 방향으로

파동을 전파시킨다. 이러한 구조는 원하는 기존의 유전율을 구현할 수 있는 단위구조의 배열로 이루어지며 이는 메타구조를 도입함으로써 구현될 수 있으나(Shelby *et al.*, 2001), 변환광학이론 기반의 설계는 설계자의 지식과 경험에 대한 의존도가 높으며 광학 또는 마이크로파 대역의 메타구조 설계는 작은 크기로 인하여 제작 및 활용에 제한이 따른다.

체계적인 구조설계 방법인 위상최적설계는 목적함수를 최대화하기 위한 설계영역 내의 최적의 물질분배를 통해 구조를 도출하는 방법이다. 이를 전자기 해석과 결합하여 밀도법 기반의 자유전율 물질 분배를 통한 전자기장 제어의 연구가 진행된 바가 있다(Andkjær and Sigmund, 2011). 또한 페이즈필드 설계법을 통한 전자기장 내의 구조설계 연구가 활발히 진행되고

* Corresponding author:

Tel: +82-2-2123-2859; E-mail: yoojh@yonsei.ac.kr

Received November 2 2017; Revised January 4 2018;

Accepted January 5 2018

©2018 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.

있으며(Shin *et al.*, 2017; Seong and Yoo, 2016), 마이크로 대역의 콜리메이터 설계에 적용한 연구도 수행된 바 있다(Kim *et al.*, 2016). 그러나 위상최적설계를 이용한 전자기내의 구조 설계의 결과는 복잡한 형상이나 섬(island) 구조를 나타내고 있어 실제적인 구현에 어려움이 있다. 또한 공기영역이 존재하는 경우 복잡한 형상과 맞물려 구조적인 취약성을 나타낼 수 있다.

본 연구에서는 페이즈필드 설계법을 통해 X밴드 대역의 10 GHz에서 작동하는 다중 유전체 구조의 콜리메이터 설계를 제시하고자 하였다. 또한 위상최적화 설계 결과에서 나타나는 중공(void)영역을 유전율이 낮은 다른 유전체로 대체함으로써 구조적인 취약성을 극복하는 방법을 제시하고자 한다. 설계된 구조를 바탕으로 최종 형상을 단순한 컷오프(cut-off) 방법을 통해 도출하고, 그 성능을 수치 해석적 방법을 통해 검증하고자 하였다.

2. 최적화 방법

2.1 수정된 페이즈필드 설계법

페이즐필드 모델은 자연계에 존재하는 상(phase)의 전이를 수학적으로 모델링한 것으로 반응-확산식을 이용해서 묘사되어진다. 이 식을 위상최적화 기법에 적용한 것이 페이즈필드 설계법(Choi *et al.*, 2011)으로 시간에 따른 설계변수의 변화는 다음의 반응-확산식으로 계산된다.

$$\frac{\partial \phi(x,t)}{\partial t} = \kappa \nabla^2 \phi(x,t) - \frac{\partial W(\phi, E(\phi))}{\partial \phi} \quad (1)$$

여기서, ϕ 는 위상최적화 과정의 설계변수인 페이즈필드 파라미터(parameter)를 나타내며, t 는 가상의 시간을 나타낸다. 우변의 κ 는 확산계수로 전체영역의 형상 복잡도와 물질 간 경계층의 두께를 조절한다. W 는 double well potential(DWP) 함수가 적용된 목적함수로 다음과 같은 형태로 표현된다(Takejawa *et al.*, 2010).

$$W(\phi) = a w(\phi) + \left| \frac{\partial I(\phi, E(\phi))}{\partial \phi} \right|_{t=t1} g(\phi) \quad (2)$$

여기서, $w(\phi) = \phi^2(1-\phi)^2$ 로 smooth dirac-delta 함수를 나타내며 a 는 이에 적용되는 상수이다. $\partial I/\partial \phi$ 는 가상의 시간 $t1$ 에서의 민감도를 나타내며, $g(\phi) = \phi^3(6\phi^2 - 15\phi + 10)$ 로 smooth Heaviside 함수가 적용된다. 이에 따라서 식 (1)은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \kappa \nabla^2 \phi - a w'(\phi) - \left| \frac{\partial I(\phi, E(\phi))}{\partial \phi} \right|_{t=t1} g'(\phi) \quad (3)$$

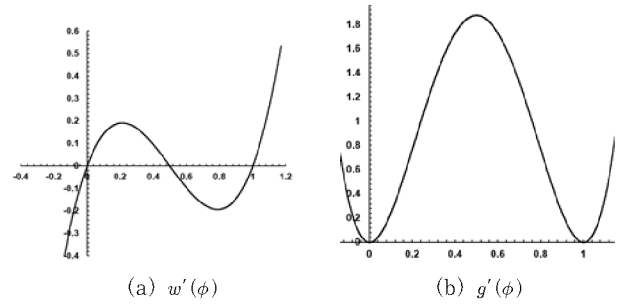


Fig. 1 Double well potential function

$w(\phi)$ 와 $g(\phi)$ 의 미분값의 그래프는 Fig. 1에 나타낸 바와 같다. 이에 따라 페이즈필드 변수 ϕ 는 $w'(\phi)$ 에 의해 0과 1로 수렴성이 증가하고 민감도의 계산은 $g'(\phi)$ 에 의해 회색밀도 영역에서만 계산된다.

2.2 전자기파 해석과정

본 연구에서는 COMSOL Multiphysics 상용 패키지를 이용하여 전자기파 해석을 수행하였으며 TE(transverse electric) 모드의 지배방정식은 다음과 같이 정의된다.

$$\nabla^2 \mathbb{E} + k^2(1 - \frac{\sigma}{\omega \epsilon}) \mathbb{E} = 0, \quad \mathbb{E} = E_z \tilde{e}_z \quad (4)$$

여기서, k 는 파수(wave number), ω 는 주파수로, σ 는 전도도를, ϵ 은 유전율을 나타낸다. 설계영역 내의 유전율을 변화함으로써 전체 전자기장의 분포를 변화시키게 되며, 설계변수의 변화에 따른 유전율은 다음과 같이 정의된다.

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r, \quad \epsilon_r = \epsilon_{die1} + \phi(\epsilon_{die2} - \epsilon_{die1}) \quad (5)$$

여기서, ϵ_0 는 공기의 유전율을 나타낸다. 상대유전율 ϵ_r 은 $\phi=0$ 인 경우 유전체 1의 유전율(ϵ_{die1})을, $\phi=1$ 에서 유전체 2의 유전율(ϵ_{die2})을 가지게 된다. 제작 가능성을 고려하여 선정된 유전체는 폴리프로필렌(PP)과 파라핀(paraffin)으로 각각의 상대 유전율은 2.93-0.032i와 2.21-0.005i이다.

2.3 최적화 모델

최적화 과정에서 설계영역 Ω_{design} 과 목적함수 측정을 위한 목표영역 Ω_{target} , 그리고 수치해석의 경계조건을 Fig. 2(a)에 나타내었다. 포트(port)에서 발생하는 10GHz 입사파는 도파관(wave guide)를 통해 원형파로 발생되고 파동을 효과적으로 집중시키기 위하여 설계영역을 도파관 가까이 위치시

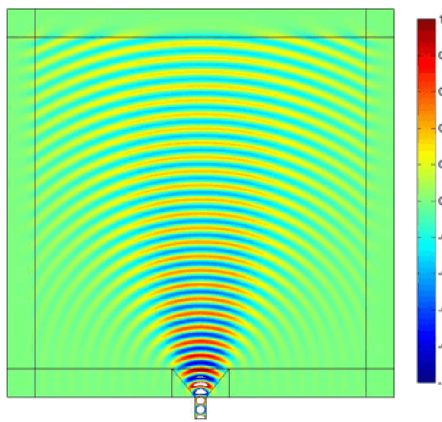
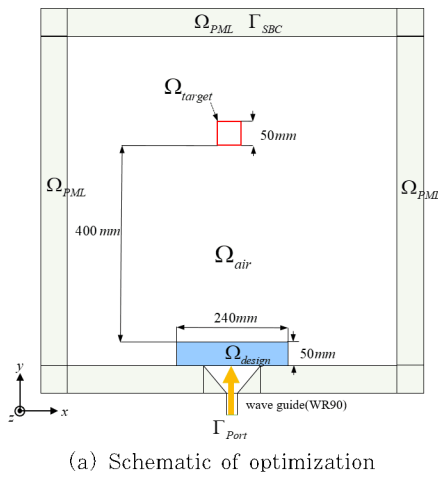


Fig. 2 Model for numerical analysis and design

켰다. Ω_{PML} (perfectly matched layer)와 Γ_{SBC} (scattered boundary condition)은 파동의 흡수를 위한 것으로 파동의 무한 전파를 모사한다. Fig. 2(b)는 자유공간에서의 파동의 전파를 보여주고 있다.

다중 유전체 구조의 콜리메이터 설계문제의 정식화에 따른 목적함수는 다음의 식 (6)와 같다.

$$\text{Maximize } I = \int_{\text{target}} \|E(\phi)\| d\Omega \quad (6)$$

여기서, I 는 목표영역의 전기장 세기의 표준값(norm)을 면적분한 것으로 측정영역 내로 파동세기를 집중시키는 것을 목표로 한다. 국소 최적값으로의 도출을 피하기 위하여 체적 제약조건은 부여되지 않았다. 최적화 과정은 COMSOL 모듈과 Matlab 프로그래밍을 이용하여 수행되었다.

3. 페이즈필드 설계법을 통한 위상최적화

3.1 최적화 결과

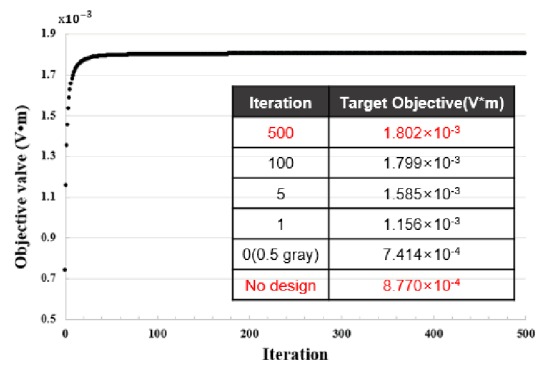
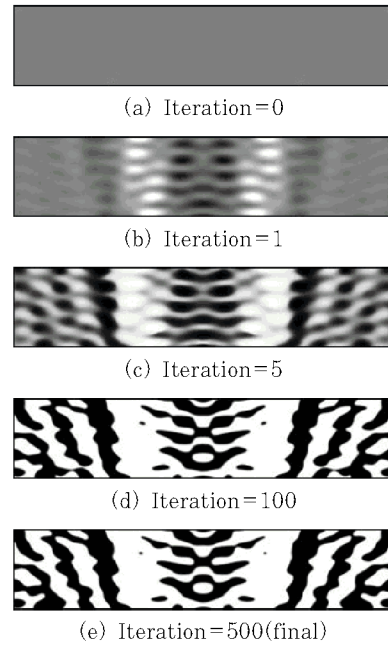


Fig. 3 Convergence history of optimization process

초기 형상은 설계영역 전체의 ϕ 를 0.5로 설정하여 회색 밀도에서 시작하도록 하였다. 설계변수의 갱신이 진행됨에 따른 형상의 변화와 목적함수의 변화를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3(a)~(e)의 검정색 영역은 폴리프로필렌, 흰색 영역은 파라핀을 의미한다. 초기 5회 이내의 갱신에서 대략적인 형상이 도출되고 최적화가 진행됨에 따라서 회색밀도가 사라지면서 물질의 경계가 확실해 진다.

Fig. 3(f)는 최적화 과정에서의 목적함수 변화를 보여주고 있다. 초기에 많은 회색밀도 영역이 존재함에도 불구하고 목적함수 값이 점차적으로 상승하는 것을 볼 수 있다. 이는 DWP 함수의 적용에 따라 중간밀도 영역의 민감도 계산이 효과적으로 이루어진 것에 기인하며, 체적 제약조건 없이도 목적함수가 안정적으로 수렴함을 확인할 수 있다. 그래프 안의 표는 각 반복 횟수에서의 목적함수 값을 나타낸 것으로 콜리메이터 설계 최종 결과는 형상이 없는 파동대비 205%의 값을 갖는 것을 확인할 수 있다.

3.2 Cut-off를 통한 모델링 결과의 해석

페이즈필드 설계법을 통해 얻은 결과는 물질 간 경계에 회색 밀도가 존재하므로 이를 $\phi=0.5$ 의 등위면을 따라 컷오프 (cut-off)를 진행하였다. Fig. 4는 형상모델링 결과를 보여주고 있다. 추가적인 수치해석을 진행하기 위하여 이를 폴리프로필렌 영역과 파라핀 영역을 분리한 모델을 Fig. 4(b)와 (c)에 제시하였다. 전체영역 중 폴리프로필렌은 41.7%, 파라핀은 58.3%를 차지하고 있으며, 설계영역 내에 중공영역이 없는 콜리메이터 구조가 도출된 것을 확인할 수 있다.

최종 모델링의 결과에 대한 전자기 해석결과를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5(a)에서 포트에서 발생된 압사파의 파동이 목표영역으로 집중되는 것을 확인할 수 있으며 콜리메이터 가장자리에는 약간의 산란현상이 발생한다. 전기장의 세기의 비교를 Fig. 5(b)를 통해 보여주고 있다. 목적함수 값은 $1.815 \times 10^{-3} V \cdot m$ 으로 회색밀도가 제외된 결과 근소하게 상승하였다. 또한 콜리메이터와 거리에 따른 집중효과를 확인하기 위해 수평 절단면을 통해 비교 분석한 것을 Fig. 5(c)를 통해 보여주고 있다. 각 절단면의 거리는 150mm로 파장의 5배에

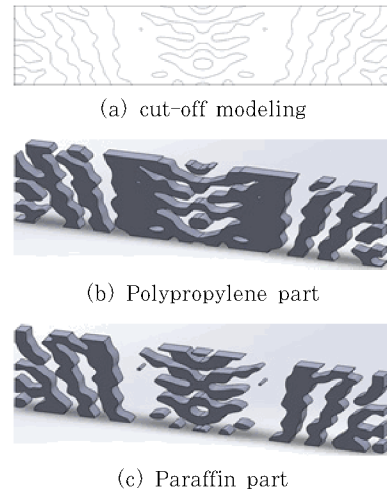


Fig. 4 Modeling of the optimized configuration

해당한다. 모든 경우에 있어서 자유공간 대비 전기장의 세기가 크게 향상되었으며 목표영역과 콜리메이터 사이에서의 전기장의 세기가 유사함을 확인할 수 있다. 목표영역을 지나서는 전기장의 세기가 약간 감소하고 있지만 전자기파의 집중효과는 유지됨을 확인할 수 있다.

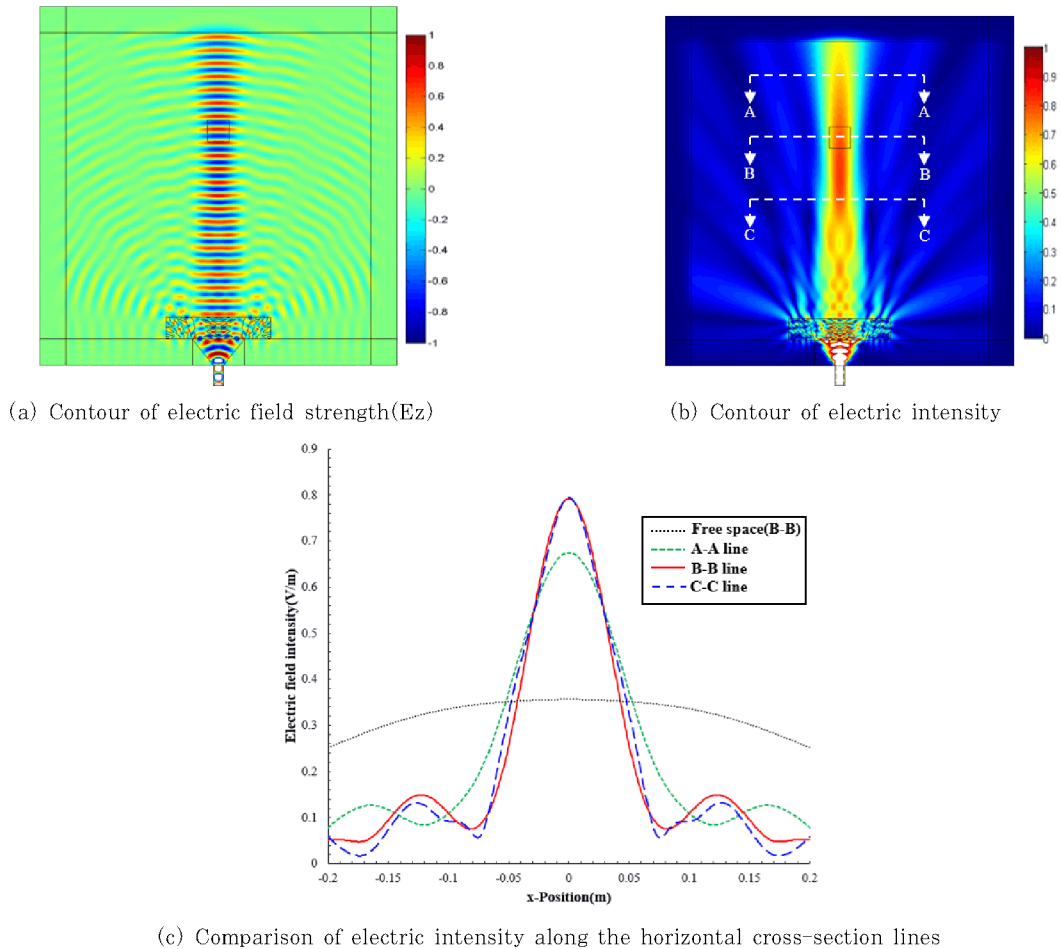


Fig. 5 Electric field contours of the final model through multi-dielectric collimator design

4. 최종 형상의 수치 해석적 평가

4.1 집중 파동의 역변환 효과 해석

Fig. 6는 콜리메이터에 의해 집중된 전자기파의 역변환 여부를 확인하기 위한 해석결과를 보여주고 있다. 두 번째 콜리메이터를 파장의 5배인 150mm를 이격시켜 180도 회전하여 위치시켜 해석하였다. 포트에서 발생된 파동은 아래쪽의 콜리메이터에 의해 집중 파동으로 변환되며 대칭시킨 콜리메이터에 의해 반사와 투과가 동시에 진행되었다. 따라서 두 번째 콜리메이터에 의하여 반사된 전자기파에 의해 가운데 영역은 보강-상쇄가 발생하는 것을 확인할 수 있으며, 투과된 파는 다시 원형 파동의 형태로 변환되어 파동의 폭이 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 역변환 콜리메이터로부터 43mm 거리에서 최대 세기를 가지며 이는 원래의 포트와 콜리메이터의 거리인 60mm 보다 짧은 것으로 이러한 거리의 차이는 두 번째 콜리메이터를 통해 전자기파의 일부가 산란됨에 기인한다. 또한 유전율에서의 손실항(loss term)의 영향으로 완벽히 대칭적인 전기장 분포를 보여주지 않고 있다. 그러나 이러한 해석 결과는 설계된 콜리메이터의 구조는 평행파를 원형파로 변환시키는 역변환이 가능함을 보여주고 있다.

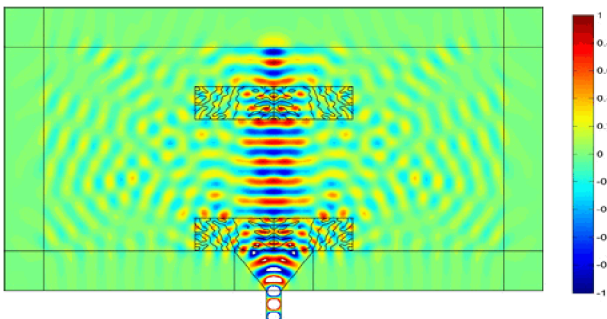


Fig. 6 Electric field contour for reverse transformation

4.2 구조적 내구성 해석

기존 위상최적화 기법 기반의 단일 유전체 구조를 갖는 콜리메이터는 그 형태를 유지하기 위하여 제작 과정에서 인위적으로 얇은 층을 부여하게 되며(Kim et al., 2016), 중공영역의 영향으로 구조적 내구성이 취약하다. Fig. 7은 설계된 구조에서 파라핀 영역을 중공영역으로 대체하고 얇은 지지층을 갖는 단일 유전체 구조와 원래의 설계된 다중 유전체구조의 응력 분포의 비교 결과를 나타내고 있다. 수치해석에 작용된 하중은 100N의 수평 압축력이고 폴리프로필렌은 1.5GPa의 영률과 0.42의 포아송(poisson) 비를 가지며, 파라핀의 영률과 포아송비는 각각 200MPa, 0.45이다. Fig. 7(a)의 중공영역이 있는 단일

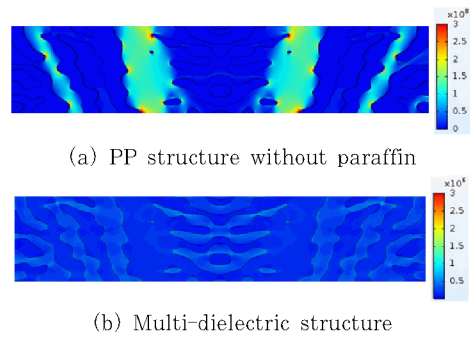


Fig. 7 Stress distribution of the collimator under compressive load(unit: Pa)

유전체 구조에서는 최대 536MPa의 높은 응력집중 현상이 발생하는 것을 확인할 수 있으며, Fig. 7(b)의 다중 유전체 구조에서는 응력이 골고루 분산되어 최대 1.23MPa의 적은 응력이 작용하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 다중 유전체 구조로 설계-제작할 경우 전자기적 성능을 떨어뜨릴 수 있는 얇은 지지층 구조가 필요하진 않고, 단일 유전체 구조물에서 기대하기 어려운 구조적 내구성을 확보할 수 있다.

4.3 X밴드 대역폭에서의 성능

X밴드 대역인 8~12GHz에서의 설계된 콜리메이터의 성능을 확인하기 위해 0.5GHz 간격으로 측정영역에서의 전기장 세기의 해석 결과를 도출하여 Fig. 8에 나타내었다. 그래프에서는 10GHz에서 콜리메이터가 없을 때의 세기를 1로 하여 해석의 결과를 정규화하여 나타내었다. 설계된 콜리메이터는 목표 주파수인 10GHz에서 2.05배의 가장 높은 전기장 세기를 가짐을 확인할 수 있으며 9GHz에서는 오히려 자유공간대비 낮은 세기를 보여주고 있다. 8~9.5GHz의 주파수 대역에서는 평균 1.17, 이보다 높은 10.5~12GHz 주파수 대역에서는 평균 1.43의 전기장 세기 증대의 효과를 확인할 수 있다. 따라서 X

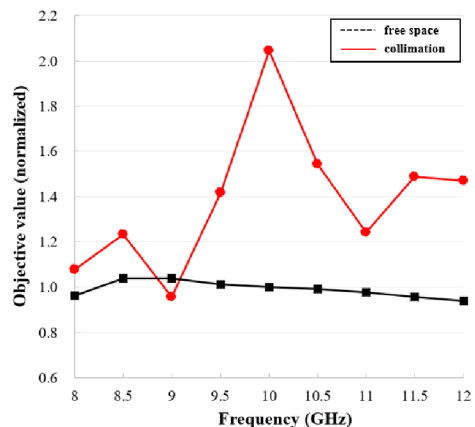


Fig. 8 Comparison of electric intensity at the measuring area in the X-band range

밴드 주파수 범위에서 균일한 성능을 얻기 위해서는 이를 고려한 설계 방법의 적용이 필요함을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 페이즈필드 설계법을 이용한 다중 유전체 구조의 RF 콜리메이터 설계를 수행하였다. 설계된 구조의 수치 해석을 통하여 목표 영역으로 파동을 효과적으로 집중시킴으로써 콜리메이터로써 효과적인 성능을 얻을 수 있음을 확인하였다. 폴리프로필렌과 파라핀을 이용한 다중 유전체를 이용하여 설계영역 내의 중공영역을 제거함으로써 기계적 내구성의 향상을 추구하였다. 현재의 연구 결과는 목표 주파수에서는 만족스러운 성능을 보여주고 있으나, X밴드 대역과 같은 광대역에서의 성능을 만족할 수 있는 추가적인 연구가 요구된다.

감사의 글

이 논문은 2016년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단(NRF-2016R1A2B4008501)과 국방과학연구소(UD160026GD)의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

Andkjær, J., Sigmund, O. (2011) Topology optimized low-contrast all-dielectric optical cloak, *Appl. Phys. Lett.*, 98, 021112.
 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.

Jiang, W.X., Cui, T.J., Ma, H.F., Zhou, X.Y., Cheng, Q. (2008) Cylindrical-to-Plane-Wave Conversion Via Embedded Optical Transformation, *Appl. Phys. Lett.*, 92, 261903.
 Kim, H., Park, J., Seo, I., Yoo, J. (2016) Two-dimensional Dielectric Collimator Design and Its Experimental Verification for Microwave Beam Focusing, *Appl. Phys. Lett.*, 109, 151902.
 Kwon, D., Werner, D. (2008) Transformation Optical Designs for Wave Collimators, Flat Lenses and Right-angle Bends, *Opt. Express*, 16, pp.11555~11567.
 Leonhardt, U. (2006) Optical Conformal Mapping, *Science*, 312, pp.1777~1780.
 Pendry, J.B., Schurig, D., Smith, D.R. (2006) Controlling Electromagnetic Field, *Science*, 312, pp.1780~1782.
 Seong, H.K, Yoo, J. (2016) Topological Design of the Film-Coupled Nanoparticle for the Field Intensity Enhancement over the Broadband Visible Spectrum, *Appl. Phys. Lett.*, 108, p.201904.
 Shelby, R.A., Smith, D.R., Schultz, S. (2001) Experimental Verification of a Negative Index of Refraction, *Science*, 292, p.5514.
 Shin, H., Heo, N., Park, J., Seo, I., Yoo, J. (2017) All-Dielectric Structure Development for Electromagnetic Wave Shielding using a Systematic Design Approach, *Appl. Phys. Lett.*, 110, p.021908.
 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.

요 지

본 연구에서는 페이즈필드 설계법을 통한 다중 유전체로 구성된 콜리메이터 구조를 설계하였다. 제작 가능성을 고려하여 폴리프로필렌과 파라핀을 유전체 재질로 선정하였고, 측정영역의 전기장의 세기의 면적분으로 계산하여 이를 최대화하는 것으로 설계의 목적 함수를 설정하였다. 두 가지 유전체 재질을 이용하여 설계영역 내의 중공영역이 배제된 구조를 도출하였으며 컷오프를 통해 최종 형상을 모델링하였다. 수치해석을 통하여 설계된 다중 유전체 구조의 콜리메이터를 이용하는 경우 자유공간 내의 원형 전자기파 대비 측정영역에서 105%의 전기장 세기가 증가된 평행파를 생성하는 콜리메이터의 성능을 확인하였다. 설계된 모델의 수치해석을 통하여 콜리메이터의 역변환 가능성과 구조적 내구성의 증가를 확인하였고, X밴드 대역 전체에서의 성능을 평가하였다.

핵심용어 : 다중 유전체 콜리메이터, 페이즈필드 설계법, 수치해석적 검증