THE JOURNAL OF KOREAN INSTITUTE OF ELECTROMAGNETIC ENGINEERING AND SCIENCE. 2016 Jun.; 27(6), 491～494.

http://dx.doi.org/10.5515/KJKIEES.2016.27.6.491
ISSN 1226-3133 (Print) · ISSN 2288-226X (Online)

준등각 맵핑 기반 전자기파 투명화 구조의 실험적 검증

Experimental Verification of Electromagnetic Cloak Based on Quasi-Conformal Mapping

김용준 · 서일성* · 고일석** · 이용식

Yongjune Kim · Ilsung Seo* · Il-Suek Koh** · Yongshik Lee

요 약

본 논문에서는 준등각 맵핑 기반 전자기파 투명화 구조의 산란 단면적(Scattering Cross Section: SCS)을 최소화 시키는 설계 방법을 제시한다. 준등각 맵핑에 기반하여 설계한 전자기파 투명화 구조를 사각형 형태로 잘라낸 뒤 경계면 밖의 굴절률과 내부의 1미만인 굴절률을 자유 공간으로 근사하는 방법을 사용함으로써 구현하기 어려운 굴절률 문제를 해결하였다. 사각형 형태의 크기는 시뮬레이션을 통해 전자기파 투명화 구조를 적용한 마름모형 금속 물체의 산란 단면적이 최소가 되도록 최적화하였다. 설계된 자유 공간형 전자기파 투명화 구조를 3D 프린터를 이용하여 제작, 산란파 저감 특성을 전자기장 스캐너를 이용하여 실험적으로 검증하였다.

Abstract

A design method is proposed to minimize the scattering cross section(SCS) of the electromagnetic cloak based on the quasi-conformal mapping. Often times in such cloaking structures, parts that require refractive index below one are approximated with free space because of the difficulty involved with realization. In this process, preformance degradation is inevitable. In this work, the size of the cloak is optimized to compensate for the deterioration, and thus to minimize the scattering cross section of a diamond shaped conductor. Proposed cloak is fabricated using a 3D printer, and verified by measuring the cloaking performance of a diamond shaped aluminum target.

Key words: Electromagnetic Cloak, Quasi-Conformal Mapping, Scattering Cross Section

Ⅰ. 서 론

메타물질(metamaterial)을 활용하여 2006년에 최초로 실험적 검증에 성공한 전자기파 투명화(electromagnetic cloak) 기술은 전자기파가 은폐시키고자 하는 물체 주변을 돌아가도록 전파 경로를 조절함으로써 산란파의 발생을 억제하여 자유공간과 동일한 전자기적 현상이 나타나도록 하는 기술이다[1]. 하지만 최초 보고된 변환 광학(transformation optics) 기반 전자기파 투명화 구조[2]는 비등방성 물질로 설계되므로, 메타물질을 활용하더라도 구

「본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 나노응용 특화 연구센터와 인하대의 지원으로 수행되었습니다.」

연세대학교 전기전자공학과(Department of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University)
*국방과학연구소 제4기술본부(Agency for Defense Development)
**인하대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Inha University)

· Manuscript received September 22, 2015 ; Revised October 14, 2015 ; Accepted November 3, 2015. (ID No. 20150922-04S)

· Corresponding Author: Yongshik Lee (e-mail: yongshik.lee@yonsei.ac.kr)

ⓒ Copyright The Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science. All Rights Reserved.

현이 매우 어렵고, 공진형 메타셀의 특성상 광대역 동작이 어렵다는 한계점을 갖는다.

근래 보고된 또 다른 대표적 전자기파 투명화 기술은 평면형 전자기파 투명화(ground-plane cloak) 구조[3]로, 평면 위에 놓인 물체를 투명화시켜서 입사하는 전자기파가 마치 평면에서 스넬의 법칙(Snell's law)을 따라 반사가 일어나도록 한다. 이 기술은 투명화시키고자 하는 물체를 감싸는 사각형 물질이 준등각 맵핑(quasi-conformal mapping) 기술에 의하여 직교 좌표계 그리드로 맵핑되어 물체를 포함한 평면이 전자기적으로 평면처럼 보이도록 하는 원리이다.

준등각 맵핑 기술의 가장 큰 장점은 실제 제작이 용이한 등방성 전자기 파라미터를 산출할 수 있는 점이다. 따라서 앞서 보고된 비등방성 물질 기반의 자유 공간형 전자기파 투명화 구조[2]의 대안으로 준등각 맵핑 기술로 설계된 평면형 전자기파 투명화 구조를 대칭시켜서 구현한 연구 사례가 보고된 바 있다[4]. 이러한 연구는 기존 자유 공간형 전자기파 투명화 기술이 비등방성 물질 기반이라는 치명적인 단점을 극복하였다는 큰 성과를 거두기는 했지만, 실제 산란 감소에 대한 정량적 분석, 또는 산란 감소 효과를 위한 구조적 최적화 등 그 전자기적 기능에 대한 검증 및 최적화가 이루어지지 않았다.

본 논문에서는 준등각 맵핑 기반 자유 공간형 전자기파 투명화 구조의 산란 특성을 정량적으로 분석하고, 산란 단면적을 최소화 시키는 투명화 구조의 설계 기술을 제시한다. 마지막으로 3D 프린터를 이용하여 구조를 제작, 측정하여 산란파 저감 특성을 실험적으로 검증하였다.

Ⅱ. 본 론

2-1 자유 공간형 전자기파 투명화 구조 설계

준등각 맵핑 기반의 자유 공간형 전자기파 투명화 구조는 그림 1(a)와 같이 마름모형 은폐 공간이 삽입된 구조 내에 직교성과 가로 세로 비율을 유지한 그리드를 생성한 뒤, 그림 1(b)의 자유 공간에서 직교하는 그리드와 전자기적으로 동일한 효과를 나타내는 전자기 파라미터를 산출하는 방법으로 설계할 수 있다[3]. 즉, 그림 1(a)와 1(b)

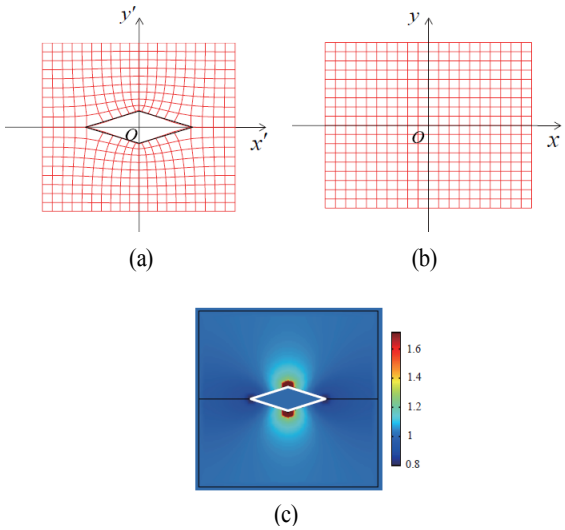


그림 1. (a) 변환 후 자유 공간형 전자기파 투명화 구조 내부의 직교 그리드, (b) 준등각 맵핑 기반 변환 전 자유 공간 및 직사각형 그리드, (c) 설계된 투명화 구조의 굴절률 분포

Fig. 1. (a) Rectangular grids after appling quasi-conformal mapping, (b) Rectangular grids of free space before appling quasi-conformal mapping, (c) Refractive index profile of free space cloak.

가 전자기적으로 등가가 되도록 각각의 위치에서 변환 전 그리드와 변환 후 그리드 사이의 Jacobian 행렬의 행렬식(determinant)의 제곱근의 역수로 굴절률을 계산할 수 있다[3]. 그림 1(c)는 이러한 준등각 맵핑을 이용해서 산출한 자유 공간형 전자기파 투명화 구조의 굴절률 분포를 나타낸다.

2-2 자유 공간형 전자기파 투명화 구조 최적화

하지만 그림 1(c)의 굴절률에는 1미만의 굴절률이 포함되어 있어 실제 완벽한 구현이 어려우며, 이런 부분들을 단순하게 자유 공간으로 근사시킬 경우, 투명화 구조의 산란파 저감 특성이 크게 저하되는 등 문제점이 발생한다. 이를 해결하기 위하여 굴절률 1 미만을 자유 공간으로 근사시키고 은폐시키고자 하는 물체 주변으로 타원형의 굴절률 분포를 적용하는 방법이 제안되었다[4]. 하지만 굴절률 분포를 적용하는 모양이나 범위에 따라 산란파 특성이 현저히 변화하는 등 근본적인 해결책은 제시된

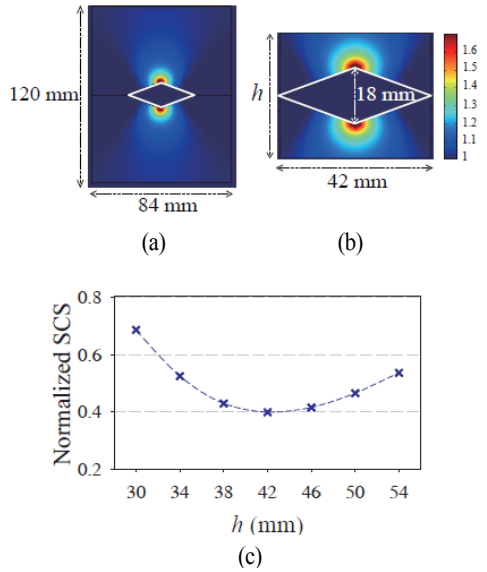
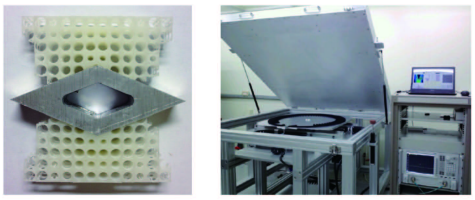


그림 2. (a) 그림 1(c)에서 1미만인 영역을 1로 근사시킨 굴절률 분포도, (b) 직사각형 경계면을 이용하여 잘라낸 굴절률 분포도, (c) 잘라낸 굴절률 분포도의 높이 변화에 따른 정규화된 산란 단면적 시뮬레이션 결과

Fig. 2. (a) Refractive index profile of which the refractive indices under 1 are approximated to 1, (b) Refractive index profile cut by rectangular shaped boundary which has height h, (c) Simulation result of normalized SCS for various h.

바 없다. 본 논문에서는 설계한 투명화 구조의 크기에 따른 산란파 특성을 분석하여 전자기파 투명화 구조의 최적의 크기를 산출하는 설계 방법을 제시한다.

그림 2(a)는 그림 1(c)의 굴절률 분포에서 1 미만인 영역을 1로 근사시킨 구조를 나타내며, 그림 2(b)는 그림 2(a)의 구조를 임의의 높이 h를 갖는 직사각형 형태로 잘라낸 경우이다. 그림 2(a)에서 마름모형 은폐 공간의 폭 이상의 범위에서는 굴절률이 1로 근사되므로 직사각형 경계면의 폭은 마름모 형 반사체의 폭인 42 mm로 고정하였다. 그리고 그림 2(c)는 높이 h를 변화시켜가며 10 GHz에서 자유 공간형 전자기파 투명화 구조의 산란 단면적을 유한 요소법(Finite Element Method: FEM) 기반의 전자기 해석 툴인 Comsol Multiphysics를 이용해서 계산한 결과이다. 길이와 높이가 각각 1.4 λ_0, 0.6 λ_0인 마름모형 은폐 공간은 PEC 물질로 채워져 있다고 가정하였으며,



(a) (b)

그림 3. (a) 3D 프린터로 제작한 유전체 기반 자유 공간형 전자기파 투명화 구조, (b) 전자기장 스캐너

Fig. 3. (a) Electromagnetic free space cloak fabricated by 3D printer, (b) Electromagnetic field scanner.

산란 단면적 감소 효과를 확인하기 위해서 투명화 구조의 산란 단면적은 투명화 유전체를 제거한 마름모형 PEC의 산란 단면적으로 정규화하여 나타내었다. 정규화된 산란 단면적은 마름모형 PEC 물체에 투명화 구조 적용 전후 총 산란 전력의 비로 구해지며, 총 산란 전력은 산란파를 원 거리장으로 변환하여 수평각(ϕ)에 대해 적분함으로써 구할 수 있다. 그림 2(c)로부터 산란 단면적이 최소가 되는 최적의 높이 h_{opt}=42 mm를 도출할 수 있으며, 이때 정규화된 산란 단면적은 0.4047이다.

2-3 3D 프린터 기반 투명화 구조 제작 및 측정 결과

시뮬레이션을 통해 도출된 최적의 높이 h_{opt}=42 mm인 그림 2(b) 형태의 자유 공간형 전자기파 투명화 구조를 3D 프린터를 이용하여 그림 3(a)와 같이 제작하였다. 굴절률 분포를 한 변의 길이가 2.45 mm인 정육면체 단위 셀로 차분한 뒤, 유전율 2.95 및 유전 손실 탄젠트(dielectric loss tangent) 0.025를 갖는 유전체에 원통형 구멍을 뚫는 방법으로 단위 셀을 구현하였다. 그림 3(b)의 전자기장 스캐너를 이용하여 측정하였으며, 그림 4(a)와 (b)는 원통형 파면을 갖는 전자기파를 입사시켰을 때 투명화 구조 적용 전과 후에 마름모형 알루미늄에서 산란된 전기장을 나타낸다. 그림 4(c)와 (d)는 Comsol Multiphysics를 이용한 2D 전자기파 산란 시뮬레이션 결과로 각각 평면파를 입사시켰을 때 투명화 구조 적용 전과 후의 산란된 전기장을 나타낸다. 시뮬레이션 및 측정 결과로부터 자유 공간형 전자기파 투명화 구조 적용 후 산란파의 크기가 확연하게 감소된 것을 확인할 수 있다. 그림 4(e)는

투명화 구조 적용 전후 산란파의 원 거리장 계산 결과를 비교한 것으로 측정 결과의 경우 표면 등가 이론(Surface equivalence theorem)을 적용하여 계산하였다[5]. 유전체의 손실을 고려하지 않은 이상적인 시뮬레이션 결과로부터 투명화 구조 적용 후 전방 산란이 최대 8.77 dB 감소함을

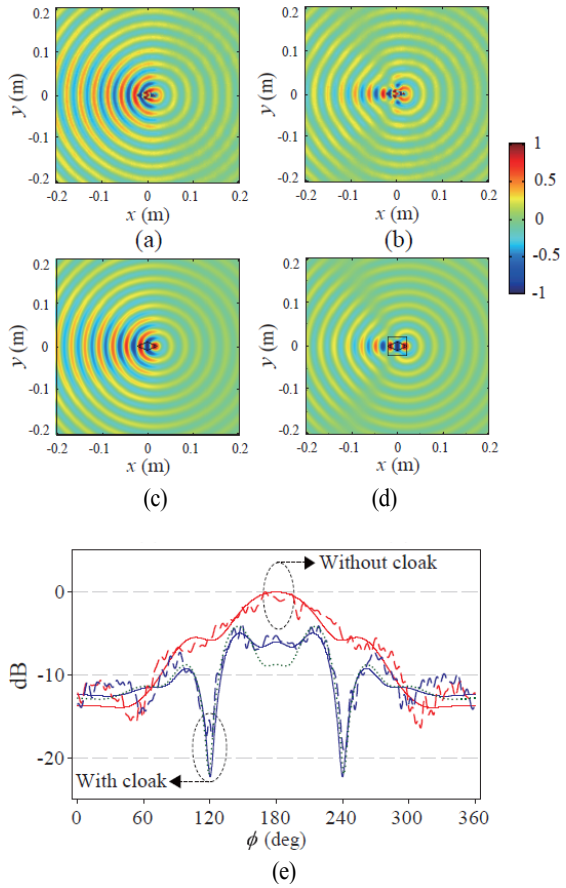


그림 4. 마름모형 알루미늄에서 산란된 전기장 측정 결과, (a) 투명화 구조 적용 전, (b) 적용 후. 마름모형 완전 도체에서 산란된 전기장 시뮬레이션 결과, (c) 투명화 구조 적용 전, (d) 적용 후, (e) 산란파의 원 거리장 비교. 실선: 시뮬레이션, 대쉬선: 측정, 점선: 무손실을 가정한 시뮬레이션

Fig. 4. Measured scattered electric field of diamond shaped aluminum, (a) Without cloak, (b) With cloak. Simulated scattered electric field of diamond shaped PEC, (c) Without cloak, (d) With cloak. (e) Comparison of far-field patterns of scattered fields. Solid lines: Simulations, Dashed lines: Measurements, Dotted line: Lossless simulation.

확인하였으나, 손실을 고려한 경우 약 6.05 dB, 측정 결과로부터 약 5.3 dB 감소한 결과를 확인하였다. 유전체의 손실이 전방 산란 크기를 증가시킨 효과를 나타내었으나 정규화된 산란 단면적은 0.4054로 손실을 고려하지 않은 경우와 비교하여 큰 차이는 없었으며, 측정 결과의 경우 0.4613으로 유전체의 유전율 오차 및 3D 프린터를 이용한 공정상의 오차로 인해 및 약 13.9 %의 차이를 나타내었지만 투명화 구조 적용 전 대비 약 54 %의 산란파 감소 효과를 실험적으로 검증하였다.

Ⅲ. 결 론

산란 단면적이 최소화되도록 준등각 맵핑 기반 자유공간형 전자기파 투명화 구조를 최적화하는 방법을 제안하였다. 메타물질을 이용하더라도 실제 구현하기 힘든 1 미만의 굴절률을 1로 근사시키는데서 오차 발생이 필연적이고 따라서 투명화 효과가 떨어질 수밖에 없다. 하지만 제안하는 방법에 따라 투명화 구조의 크기를 최적화함으로써 투명화 성능 보상이 가능하다. 최적화된 준등각 맵핑 기반 전자기파 투명화 구조는 1이상의 등방성 굴절률로 구현되므로 3D 프린터를 이용하여 제작이 가능하다는 큰 장점이 있다. 10 GHz에서 길이 및 높이가 각각 1.4 λ_0, 0.6 λ_0인 마름모형 도체 구조에 대해서 약 54 %의 전자기파 투명화 효과를 실험적으로 검증하였다.

References

[1] J. B. Pendry et al., "Controlling electromagnetic fields", *Science* 312, pp. 1780-1782, 2006.

[2] D. Schurig et al., "Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies", *Science* 314, pp. 977-980, 2006.

[3] J. Li et al., "Hiding under the carpet: A new strategy for Cloaking", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 101, pp. 203901, 2008.

[4] H. F. Ma et al., "Compact-sized and broadband carpet cloak and free-space cloak", *Opt. Express*, vol. 17, pp. 19947-19959, 2009.

[5] C. A. Balanis, *Advanced Engineering Electromagnetics*, 2nd edition, Wiley, 2012.