

Babinet의 원리와 Generalized Sheet Transition Conditions(GSTCs)를 이용한 메타스크린 해석

Metascreen Analysis Using Generalized Sheet Transition Conditions(GSTCs) and Babinet's Principle

이 선 규 · 이 정 해

Sun-Gyu Lee · Jeong-Hae Lee

요 약

Babinet의 원리와 generalized sheet transition conditions(GSTCs)를 이용한 메타스크린 해석 방법을 제안하였다. 먼저, Babinet의 원리로부터 동일한 치수를 갖는 메타필름과 메타스크린의 상보스크린 관계를 확인하였다. 이러한 특성은 메타필름의 가장 기본구조인 패치표면의 반사계수와 메타스크린의 가장 기본구조인 메쉬표면의 투과계수 결과로부터 검증하였다. 또한, GSTCs에 의해 계산된 패치표면의 반사계수와 메쉬표면의 투과계수의 관계에도 동일하게 적용됨을 확인하였다. 이를 통해 분극률 밀도(polarizability density)를 이용한 메타필름 설계가 메타스크린 설계에 이용될 수 있음을 보였다. 제안된 방법은 전자기파의 크기, 위상, 편파 등의 제어가 요구되는 다양한 메타표면 단위 구조 분석에 적용 가능할 것으로 예상된다.

Abstract

Using Babinet's principle and generalized sheet transition conditions(GSTCs), an analysis method for metascreens is proposed. First, the relation of a complementary screen between a metafilm and metascreen with the same dimensions was confirmed using Babinet's principle. These properties were verified by comparing the reflection coefficient of the patch and the transmission coefficient of the mesh. The patch and mesh are the basic structures of metafilms and metascreens, respectively. Based on these findings, it is also confirmed that the reflection coefficient of the patch surface calculated by GSTCs has the same value as the transmission coefficient of the mesh surface. It is expected that the proposed analysis methods can be applied to the magnitude, phase, and polarization of electromagnetic waves in the various unit structures of a given metasurface.

Key words: Mesh Surface, Metasurface, Metafilm, Metascreen, Polarizability, GSTCs, Babinet's Principle

I. 서 론

최근 안테나 이득을 증가시키기 위해 패치표면과 메쉬

표면의 조합으로 구성된 부분반사표면(partially reflective surface: PRS)을 이용한 파브리-페로 공진기(Fabry-Pérot cavity: FPC) 안테나^{[1],[2]}에 관한 연구가 있었다. 부분반사표

「이 연구는 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. 2015R1A6A1A03031833).」

홍익대학교 전자전기공학과(Department of Electronic and Electrical Engineering, Hongik University)

· Manuscript received April 3, 2018 ; Revised May 25, 2018 ; Accepted September 17, 2018. (ID No. 20180403-044)

· Corresponding Author: Jeong-Hae Lee (e-mail: jeonglee@hongik.ac.kr)

면은 특정 주파수 대역에서 고임피던스 표면(high impedance surface: HIS)^[3]으로 동작하며, 전송선로이론의 개방 회로 특성과 유사하게 반사계수의 크기가 1에 가까우며, 위상이 0°인 인공자기도체(artificial magnetic conductor: AMC)의 특성을 갖는다. 패치와 메쉬표면으로 구성된 부분반사표면의 특성은 각각 등가 LC 회로 이론을 통해 설명하였다^[4]. 그러나 직각입사 조건에서 계산된 L과 C 값은 입사각의 변화에 의한 부분반사표면의 반사 특성을 반영하지 못하며, 이를 설명하기 위해서 L과 C 값이 함께 변화해야 했다.

두께가 매우 얇은 메타표면의 해석을 위해 고안된 generalized sheet transition conditions(GSTCs)^[5]는 입사각에 관계없이 유일한 값을 갖는 분극률 밀도 텐서(polarizability density tensor)를 도입하였다. GSTCs에서 분극률 밀도를 이용하여 반사·투과계수를 계산^[6]할 수 있으며, 분극률 밀도를 제어하는 방법은 메타표면 설계에 이용될 수 있다.

메타표면은 독립된 산란체가 배열된 메타필름(metafilm)과 주기적인 개구면으로 이루어진 메타스크린(metascreen)으로 구분된다^[7]. 부분반사표면을 구성하는 패치표면은 메타필름에 해당하며, 기존의 분극률 밀도를 이용한 GSTCs 해석이 가능하다. 그러나 메타스크린에 해당하는 메쉬표면은 공극률(porosity)을 이용한 새로운 GSTCs가 요구된다^[8]. 이러한 공극률을 이용한 메타스크린 해석은 어려운 이론과 복잡한 수식이 요구되는 단점이 있다.

본 논문에서는 Babinet의 원리^[9]와 GSTCs를 이용한 메타스크린 설계 방법을 제안하였다. 분극률 밀도를 제어에 이용한 메타필름 설계와 상보스크린 관계를 통해, 공극률 도입 없이도 동일한 치수를 갖는 메타스크린의 설계에 적용될 수 있음을 보였다. 이를 패치표면과 메쉬표면에 적용하여 검증하였다.

II. Babinet의 원리를 이용한 상보 스크린 해석

Babinet의 원리^[9]에 의하면 상보관계의 스크린은 도체와 진공을 서로 대체함으로써 얻을 수 있다. 그림 1에서 (b)의 스크린에 대한 상보스크린은 그림 1(c)와 (d)에 해당한다. (c)의 경우, 같은 종류의 전원이 사용되었으며, 진공이 완전 자기도체(perfect magnetic conductor: PMC)로 대체되었다. 그림 1(d)의 경우, 진공과 완전전기도체(perfect electric con-

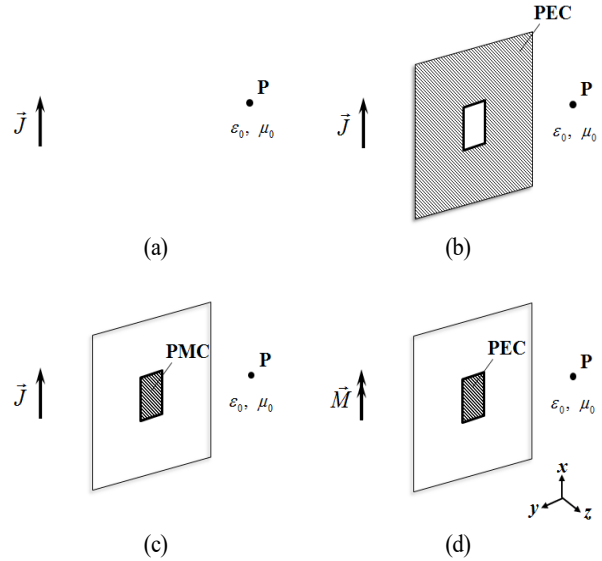


그림 1. Babinet의 원리와 상보 스크린
Fig. 1. Babinet's principle and complementary screens.

ductor: PEC)를 대체하고, 전기전류원과 자기전류원을 서로 대체한 켈레전원(conjugate source)을 사용하였다. 완전 자기도체의 경우, 자연계에 존재하지 않기 때문에 그림 1(b)에 대한 상보스크린으로 (d)가 이용된다. 그림 1(b)와 (d)의 두 상보스크린의 정규화 전계 관계는 다음과 같다^[9].

$$u_1 + u_2 = 1 \tag{1}$$

$$v_1 + v_2 = 1 \tag{2}$$

여기서 u_1 과 u_2 는 각각 그림 1(b)와 (d) 스크린 뒤의 전계(투과된 전계)를 스크린 없는 경우 (a)의 같은 지점의 전계로 정규화한 결과이다. v_1 과 v_2 는 각각 그림 1(b)와 (d) 스크린 앞의 전계(반사된 전계)를 스크린 없는 경우 (a)의 같은 지점의 전계로 정규화한 결과이다. 식 (1)로부터 스크린이 존재하는 평면 $z=0$ 에서 입사파와 투과파를 정의한 결과는 다음과 같다.

$$[T_{(b)}E_0e^{-jk_0z} + T_{(d)}E_0e^{-jk_0z} = E_0e^{-jk_0z}]_{z=0} \tag{3}$$

$$T_{(b)} + T_{(d)} = 1. \tag{4}$$

스크린 그림 1(b)와 (d)의 $z=0$ 인 지점에서 경계조건 $1+R=T$ 을 각각 나타내면 다음과 같다.

$$1 + R_{(b)} = T_{(b)}. \quad (5)$$

$$1 + R_{(d)} = T_{(d)}. \quad (6)$$

식 (4)~(6)을 연립하여 풀면 최종적으로 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$T_{(b)} = -R_{(d)} \quad (7)$$

$$R_{(b)} = -T_{(d)}. \quad (8)$$

따라서 그림 1(b)의 상보스크린에 해당하는 (d)의 투과계수는 (b)의 반사계수로부터, (d)의 반사계수는 (b)의 투과계수로 얻을 수 있다.

Babinet의 원리의 결과 식 (7), (8)을 모의실험에서 검증하기 위해 그림 2와 같이 상보관계의 정사각형 패치와 메쉬 표면을 가정하였다. 여기서 패치표면과 메쉬표면은 동일한 치수를 갖도록 설정하였고, TE 입사(전기전류원)와 TM입사(자기전류원)를 대체함으로써 켈레전원을 구현하였다.

모의실험은 ANSYS HFSS(high-frequency structure simulator) 14.0에서 진행되었다. 모의실험으로부터 얻어진 패치표면의 TE 반사계수를 식 (7), (8)에 적용하여 메쉬표면의 TM 투과계수를 계산하였다. 수직입사($\theta=0^\circ$) 조건에서 계산 및 모의실험에 의해 얻어진 메쉬표면의 투과계수 결과를 그림 3에 나타내었다. 여기서 패치표면의 모의실험 반사계수와 식 (7), (8)을 이용하여 얻은 결과를 삼각형(크기)과 원(위상)으로, 메쉬표면의 모의실험 투과계수 결과를 실선으로 나타내었다. 추가적으로 임의의 각도 $\theta=30^\circ$ 및 $\theta=60^\circ$ 로 입사하였을 때, 패치표면과 메쉬표면의 계산 및 모의실험으로부터 얻은 결과를 그림 4에 나타내었다. 수직입사 및 임의의 각도에서 패치표면으로부터 계산된

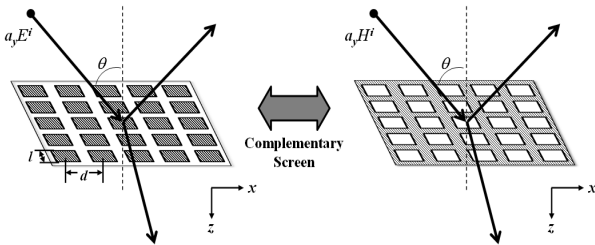


그림 2. 상보관계의 패치와 메쉬표면
Fig. 2. Complementary relation of patch and mesh surface.

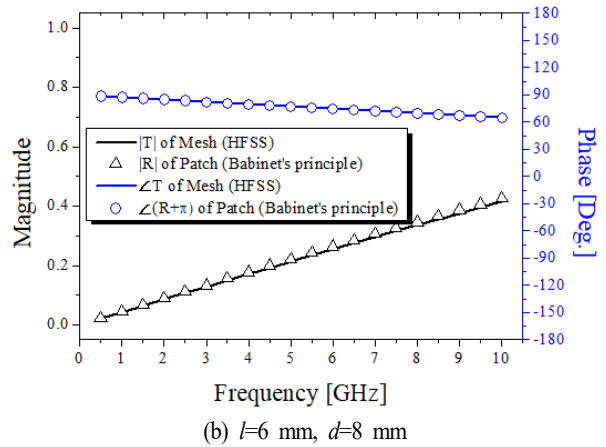
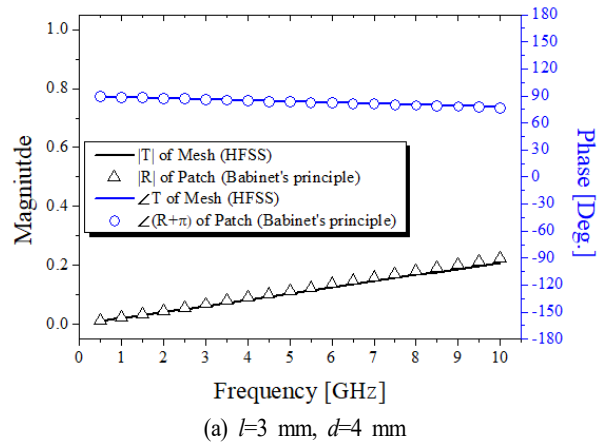


그림 3. 수직 입사조건에서의 메쉬표면의 투과계수
Fig. 3. Transmission coefficient of mesh surface at normal incidence.

결과와 메쉬표면의 모의실험 결과와 잘 일치함을 확인하였다. 이 결과들은 임의의 표면의 특성이 주어졌을 때 Babinet의 원리를 이용하여 상보스크린의 특성을 계산할 수 있음을 나타낸다.

III. Babinet의 원리를 이용한 메타스크린의 GSTCs 해석

GSTCs에 의하면, 산란체가 배열된 메타표면을 지나면서 발생한 전자계의 변화는 평균 전자계(average field)와 분극률 밀도에 의해 결정된다^[5]. 여기서 분극률 밀도는 단일 산란체의 분극률로부터 얻을 수 있다. 외부에서 가해진 전자계에 의해 대전된 산란체의 산란현상은 등가 전기·

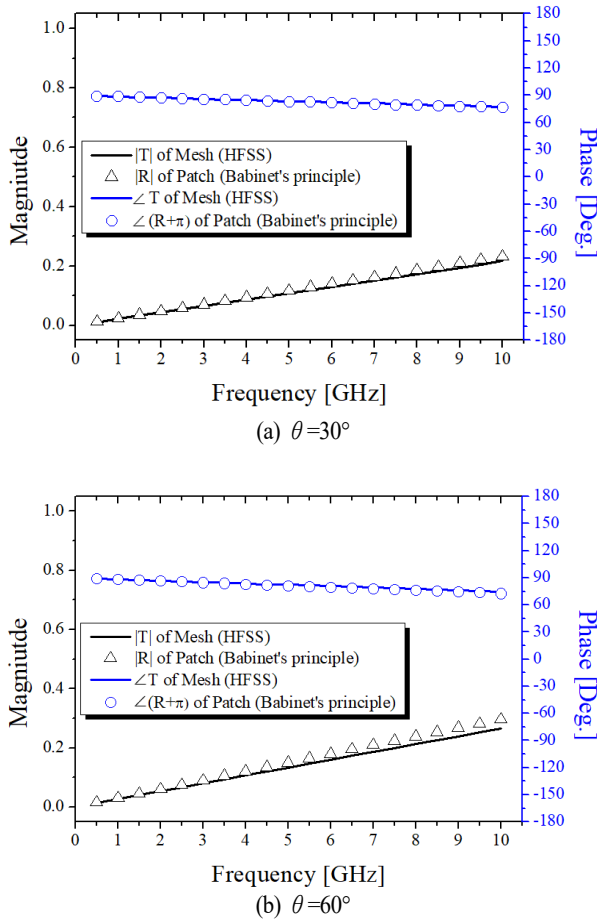


그림 4. 임의의 각도 입사조건에서 $l=3$ mm, $d=4$ mm를 갖는 메쉬표면의 투과계수
 Fig. 4. Transmission coefficient of mesh surface at oblique incidence $l=3$ mm, $d=4$ mm.

자기 쌍극자를 정의하여 설명할 수 있다^[10]. 여기서 쌍극자 모멘트와 분극률의 관계를 나타내면 다음과 같다.

$$\vec{p} = \epsilon \vec{\alpha}_E \cdot \vec{E} \quad (9)$$

$$\vec{m} = -\vec{\alpha}_M \cdot \vec{H} \quad (10)$$

여기서 \vec{p} , \vec{m} 은 각각 전기 쌍극자 모멘트와 자기 쌍극자 모멘트를 나타낸다. $\vec{\alpha}_E$, $\vec{\alpha}_M$ 은 각각 전기분극률 텐서와 자기분극률 텐서를 나타낸다.

메타필름의 반사·투과계수는 분극률 밀도를 이용한 GSTCs를 이용하여 계산할 수 있다^[6]. 메타필름에 TE 입사

조건에서의 반사·투과계수 계산식^[6]을 식 (11), (12)에 나타내었다. 여기서 α_{ES} 및 α_{MS} 는 전기 및 자기 분극률 밀도를 나타내며, 텐서의 물리량을 가진다^[5]. 적절한 분극률 밀도 값들을 선택하여 식 (11), (12)에 적용함으로써 원하는 크기와 위상을 갖는 반사·투과계수의 TE입사 조건에서 분극률을 이용하여 분극률 밀도를 계산하는 식^[5]은 식 (13)~(15)와 같다. 여기서 $\langle \alpha_E \rangle$ 는 메타표면의 산란자들이 갖는 평균 분극률, N 은 단위면적당 산란체의 수 $N=1/d^2$, $R=0.6956d$, d 는 패치의 배열 거리를 나타낸다. 식 (13)~(15)로부터, 분극률 밀도는 단일 산란체의 분극률과 배열 거리 d 에 의해 결정됨을 알 수 있다. 여기서 단일 산란체의 분극률은 산란체의 모양에 의해 결정된다. 따라서 분극률 밀도는 단위 면적당 분극률을 나타낸다.

$$R_{TE} = \frac{-j \frac{k_0}{2 \cos \theta} (\alpha_{ES}^{yy} + \alpha_{MS}^{xx} \cos^2 \theta - \alpha_{MS}^{zz} \sin^2 \theta)}{1 + \left(\frac{k_0}{2}\right)^2 \alpha_{MS}^{xx} (\alpha_{ES}^{yy} - \alpha_{MS}^{zz} \sin^2 \theta) + j \frac{k_0}{2 \cos \theta} (\alpha_{ES}^{yy} - \alpha_{MS}^{xx} \cos^2 \theta - \alpha_{MS}^{zz} \sin^2 \theta)} \quad (11)$$

$$T_{TE} = \frac{1 - \left(\frac{k_0}{2}\right)^2 \alpha_{MS}^{xx} (\alpha_{ES}^{yy} - \alpha_{MS}^{zz} \sin^2 \theta)}{1 + \left(\frac{k_0}{2}\right)^2 \alpha_{MS}^{xx} (\alpha_{ES}^{yy} - \alpha_{MS}^{zz} \sin^2 \theta) + j \frac{k_0}{2 \cos \theta} (\alpha_{ES}^{yy} - \alpha_{MS}^{xx} \cos^2 \theta - \alpha_{MS}^{zz} \sin^2 \theta)} \quad (12)$$

$$\alpha_{ES}^{yy} = \frac{N \langle \alpha_{E, yy} \rangle}{1 - \frac{N \langle \alpha_{E, yy} \rangle}{4R}} \quad (13)$$

$$\alpha_{MS}^{xx} = \frac{N \langle \alpha_{M, xx} \rangle}{1 + \frac{N \langle \alpha_{M, xx} \rangle}{4R}} \quad (14)$$

$$\alpha_{MS}^{zz} = \frac{N \langle \alpha_{M, zz} \rangle}{1 - \frac{N \langle \alpha_{M, zz} \rangle}{2R}} \quad (15)$$

(where $N=1/d^2$, $R=0.6956d$)

$$\alpha_{ES}^{yy} = \frac{2j}{k_0} \frac{R_{TE}(0) + T_{TE}(0) - 1}{R_{TE}(0) + T_{TE}(0) + 1} \quad (16)$$

$$\alpha_{MS}^{xx} = -\frac{2j}{k_0} \frac{R_{TE}(0) - T_{TE}(0) + 1}{R_{TE}(0) - T_{TE}(0) - 1} \quad (17)$$

$$\alpha_{MS}^{zz} = \frac{\alpha_{ES}^{yy}}{\sin^2\theta} - \frac{2j \cos\theta}{k_0 \sin^2\theta} \frac{R_{TE}(\theta) + T_{TE}(\theta) - 1}{R_{TE}(\theta) + T_{TE}(\theta) + 1} \quad (18)$$

몇몇 모양을 갖는 산란체에 대한 분극률의 계산 방법은 기존 연구들에서 수행되었다^{[11],[12]}. 그러나 구조가 복잡한 경우에는 분극률을 직접 계산하는 것이 어렵다. 대안으로 GSTCs에 의해 반사·투과계수로부터 분극률 밀도를 추출^[13]할 수 있으며, TE 입사조건에서의 결과를 식 (16)~(18)에 나타내었다. 여기서 분극률 밀도 추출에 이용될 반사·투과계수는 실험이나 모의실험으로부터 얻어진 결과를 이용할 수 있다. 또한 z방향의 분극률 밀도를 계산하기 위해서는 임의의 입사각에서의 반사·투과계수 정보가 필요함을 알 수 있다(TM 입사조건에 대한 계산식은 참고 문헌^{[6],[13]}에 나타나 있다. 본 논문에서는 χ 대신 α 로 기호를 통일하였다^[13]. $\chi_E = \alpha_E$, $\chi_M = -\alpha_M$).

GSTCs에 의하면, 메타필름에서 추출된 분극률 밀도를 이용하여 표면의 반사·투과계수를 계산할 수 있다. 또한 Babinet의 원리에 의해, 상보관계의 메타필름과 메타스크린의 반사·투과계수는 식 (7), (8)을 만족한다. 따라서 분극률 밀도 제어를 통한 메타필름 설계는 상보관계의 메타스크린 설계에 적용될 수 있다. 이를 확인하기 위해, 가장 기본구조인 패치표면과 메쉬표면에서 분극률 밀도와 반사·투과계수에 관한 연구를 진행하였다.

그림 5는 l 과 d 의 변화에 의한 패치표면의 반사투과·계수의 HFSS 모의실험 결과를 나타내었다. 여기서 l 이 커지거나 d 가 작아짐에 따라 반사계수의 크기는 증가함을 알 수 있다. 그림 6은 모의실험으로부터 얻어진 반사·투과계수와 식 (16)~(18)으로부터 추출된 분극률 밀도를 나타내었다. 추가적으로 기존의 이론^{[11],[12]}의 분극률로부터 계산된 분극률 밀도를 함께 나타내어 정확성을 검증하였다. 패치표면은 패치 윗면에서 전하 분리 및 루프 전류에 의해 $\alpha_{ES}^{yy} \neq 0$ 및 $\alpha_{MS}^{zz} \neq 0$ 이며, 패치의 윗면과 아랫면에 흐르는 전류 분리가 없기 때문에 $\alpha_{MS}^{xx}=0$ 이다^[6]. 여기서 식 (13)~(15)와 동일하게 l 이 커지거나 d 가 작아짐에 따라 분극률 밀도는 증가하는 것을 확인하였다. 따라서 단일 산

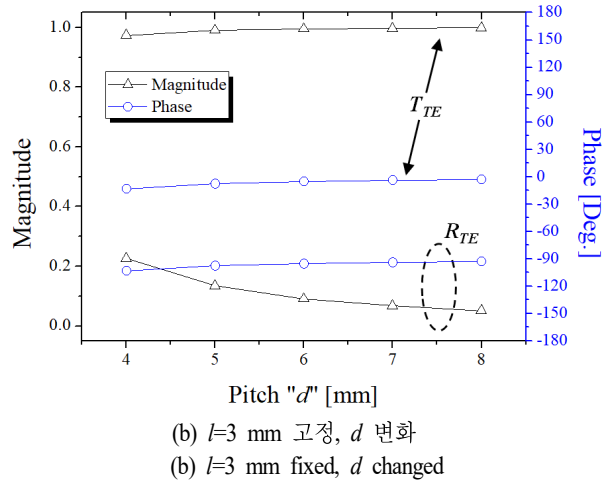
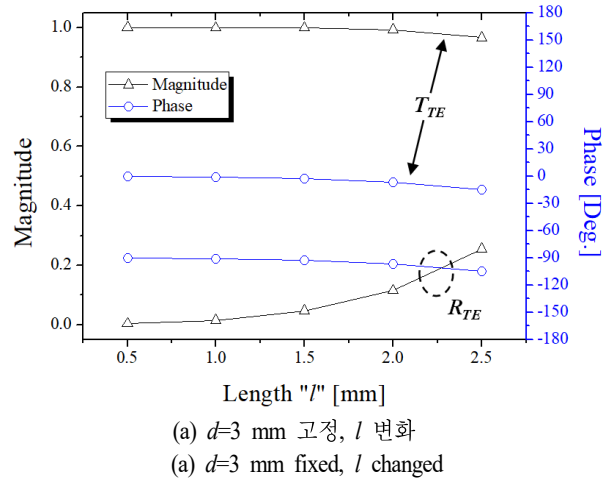
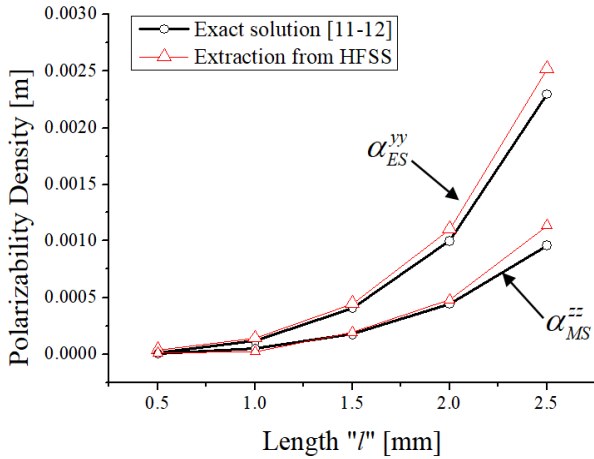


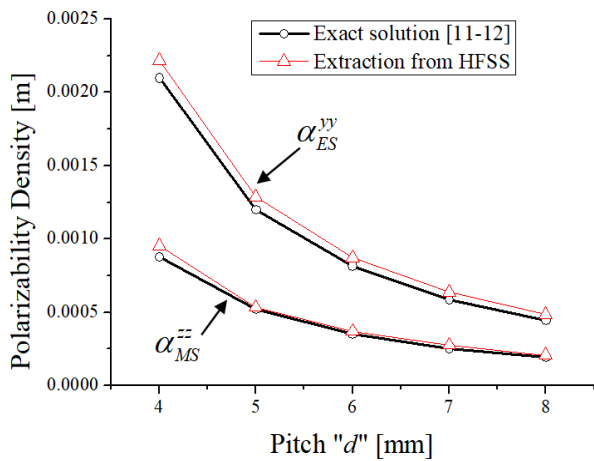
그림 5. 패치표면의 반사·투과계수 HFSS 모의실험 결과
Fig. 5. HFSS simulation results of reflection and transmission coefficients of patch surface.

란체의 구조에 의한 분극률과 배열 거리 d 의 변화를 통해 분극률 밀도 제어가 가능하며, 이를 통해 패치표면의 반사·투과계수를 제어할 수 있다.

그림 7에는 수직 입사조건에서 GSTCs로부터 계산된 패치표면의 반사계수를 식 (7), (8)에 적용하여 얻은 결과와 모의실험으로부터 얻은 메쉬표면의 투과계수를 비교하였다. 모의실험 메쉬표면의 투과계수는 패치표면의 GSTCs와 Babinet의 원리로부터 계산된 결과와 잘 일치하였다. 이러한 결과는 GSTCs의 분극률 제어를 통해 동일한 치수를 갖는 패치표면을 설계하고, 여기에 Babinet의 원리를



(a) $d=3$ mm 고정, l 변화
(a) $d=3$ mm fixed, l changed



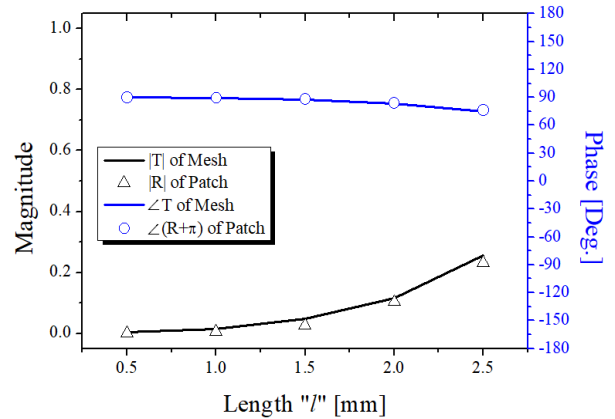
(b) $l=3$ mm 고정, d 변화
(b) $l=3$ mm fixed, d changed

그림 6. 패치표면의 분극률 밀도 결과
Fig. 6. Polarizability density results of patch surface.

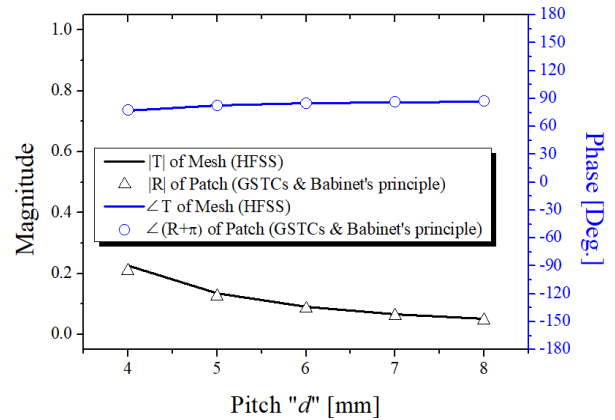
적용함으로써 원하는 특성을 갖는 메쉬표면의 설계가 가능함을 나타낸다(임의의 각도에서 메쉬표면의 특성 제어는 식 (11), (12)에 분극률 텐서 성분 적용함으로써 동일하게 적용될 수 있다).

IV. 결 론

Babinet의 원리와 GSTCs를 이용하여 메타필름의 특성으로부터 메타스크린의 특성을 해석하는 방법을 제안하



(a) $d=3$ mm 고정, l 변화
(a) $d=3$ mm fixed, l changed



(b) $l=3$ mm 고정, d 변화
(b) $l=3$ mm fixed, d changed

그림 7. 제안된 방법 및 HFSS 모의실험에 의한 메쉬표면 투과계수 결과 비교

Fig. 7. Comparison of the results of the transmission coefficients of the mesh surface by using proposed method and HFSS simulation.

였다. 메타필름에 해당하는 패치표면은 GSTCs에 의해 특성을 제어할 수 있었고, 여기에 Babinet의 원리를 적용하여 메쉬표면의 설계에 응용할 수 있음을 보였다. 여기서 분극률을 통해 분극률 밀도를 계산하는 방법과 분극률 밀도를 추출하는 방법을 적용하여 함께 검증하였다. 분극률 밀도를 이용한 메타스크린의 제어 방법은 전자기파의 크기, 위상, 편파 등의 제어가 요구되는 다양한 분야에서 응용 가능할 것으로 예상된다.

References

- [1] A. Ourir, A. de Lustrac, and J. M. Lourtioz, "All-metal-based subwavelength cavities ($\lambda/60$) for ultrathin directive antennas," *Applied Physics Letters*, vol. 88, p. 084103, Feb. 2006.
- [2] J. G. Lee, J. H. Lee, "Low-profile dual-band superstrate antenna using metasurface," *Progress in Electromagnetics Research C*, vol. 77, pp. 175-184, 2017.
- [3] D. Sievenpiper, L. Zhang, R. F. J. Broas, N. G. Alexopoulos, and E. Yablonovitch, "High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 47, no. 11, pp. 2059-2074, Nov. 1999.
- [4] S. W. Lee, G. Zarrillo, and C. L. Law, "Simple formulas for transmission through periodic metal grids or plates," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 30, no. 5, pp. 904-909, Sep. 1982.
- [5] E. F. Kueste, M. A. Mohamed, M. Piket-May, and C. L. Holloway, "Averaged transition conditions for electromagnetic fields at a metafilm," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 51, no. 10, pp. 2641-2651, Oct. 2003.
- [6] C. L. Holloway, M. A. Mohamed, E. F. Kuester, and A. Dienstfrey, "Reflection and transmission properties of a metafilm: With an application to a controllable surface composed of resonant particles," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 47, no. 4, pp. 853-865, Nov. 2005.
- [7] C. L. Holloway, E. F. Kuester, J. A. Gordon, J. O'Hara, J. Booth, and D. R. Smith, "An overview of the theory and applications of metasurfaces: The two-dimensional equivalents of metamaterials," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 54, no. 2, pp. 10-35, Apr. 2012.
- [8] C. L. Holloway, E. F. Kuester, "Generalized Sheet Transition Conditions (GSTCs) for a metascreen-A fishnet metasurface," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 5, pp. 2414-2427, May 2018.
- [9] H. G. Booker, "Slot aeriels and their relation to complementary wire aeriels (Babinet's principle)," *Journal of the Institution of Electrical Engineers*, vol. 93, no. 4, pp. 620-626, 1946.
- [10] J. F. Douglas, E. J. Garboczi, "Intrinsic viscosity and the polarizability of particles having a wide range of shapes," *Advances in Chemical Physics*, vol. 91, pp. 85-154, 1995.
- [11] N. A. McDonald, "Polynomial approximations for the electric polarizabilities of some small apertures," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 33, no. 11, pp. 1146-1149, Nov. 1985.
- [12] N. A. McDonald, "Polynomial approximations for the transverse magnetic polarizabilities of some small apertures," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 35, no. 1, pp. 20-23, Jan. 1987.
- [13] C. L. Holloway, E. F. Kuester, and A. Dienstfrey, "Characterizing metasurfaces/metafilms: The connection between surface susceptibilities and effective material properties," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 10, pp. 1507-1511, 2011.

이 선 규 (홍익대학교/박사과정)



2016년 2월: 홍익대학교 전자전기공학부 (공학사)

2018년 2월: 홍익대학교 전자전기공학과 (공학석사)

2018년 3월~현재: 홍익대학교 전자전기공학과 박사과정

[주 관심분야] 위상 배열 안테나, 메타 물질 및 메타표면 안테나

이 정 해 (홍익대학교/교수)



1985년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학사)

1988년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학석사)

1996년 3월: UCLA 전기공학과 (공학박사)

1993년 3월~1996년 3월: General Atomics 교환연구원

1996년 3월~1996년 8월: UCLA 전기공학과 Postdoctor

1996년 9월~현재: 홍익대학교 전자전기공학부 교수

[주 관심분야] 마이크로파 및 밀리미터파 소자, 안테나, Metamaterial RF 소자, 무선전력전송