

도체 타공면의 등가 매질 변환 방법에 대한 연구

Method to Convert Perforated Metal Surface to Equivalent Medium

이호성¹ · 노영훈² · 임형래³ · 김창균^{*4} · 박용우^{**5} · 정길수^{**6} · 육종관⁷

Hoseong Lee¹ · Yeong-Hoon Noh² · Hyeong Rae Im³ · Chang-gyun Kim^{*4} ·
Yong-Woo Park^{**5} · Kil-Soo Jeong^{**6} · Jong-Gwan Yook⁷

요 약

본 논문에서는 대형 구조체 해석 시 격자 구조 타공면에 의한 해석의 어려움을 해소하기 위하여 타공면을 등가 매질로 변환하는 방법을 제안하였다. 변환 대상은 고출력 전자기파 위협의 솔루션 중 하나인 함체에 주로 포함되는 육각 도체 타공면으로 하였다. 기존에 발표된 비균질 구조의 전기적 특성을 추출하는 방법을 활용하여 육각 타공 도체면의 전기적 특성을 추출하였고, 물리적 구조와 등가 매질의 반사 · 투과 특성에 대한 해석 및 비교를 통해 등가 매질 변환의 타당성에 대하여 검증 및 분석하였다.

Abstract

In this paper, a method to convert a perforated surface into an equivalent medium is proposed in order to address the difficulties faced when evaluating the perforated surfaces of lattice structures in the electromagnetic analysis of large structures. The target of conversion is a honeycomb-perforated metal surface primarily included in the enclosure, which is one of the solutions to the electromagnetic pulse threat. The electrical properties of the honeycomb-perforated metal surface are extracted using the conventional method of extracting the electrical properties from an inhomogeneous structure. The validity of the conversion into an equivalent medium is verified and analyzed by comparing the reflection and transmission characteristics of the physical structure and the equivalent medium.

Key words: Honeycomb Perforated Metal Surface, Equivalent Medium, Shielding Effectiveness(SE), Electromagnetic Pulse(EMP), Enclosure

I. 서 론

날이 갈수록 발전하는 컴퓨터와 전자기 해석 소프트웨어

어에 의해, 최근에는 중 · 대형 구조체도 3차원 전자기 시뮬레이터로 해석이 가능해졌다. 하지만 대상 구조체에 해석 주파수의 파장보다 훨씬 작은 크기의 격자 구조로 구

「해당 연구는 국방과학연구소(UE191016ED) 주관의 핵 EMP 상황 하 케이블/안테나로 유도되는 전류 해석 연구와 국토교통부 건설기술연구사업(과제번호: 19SCIP-B146646-02)의 연구비 지원을 받아 수행됨.」

연세대학교 전기전자공학부(Department of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University)

*모아소프트(Moasoftware)

**국방과학연구소(Agency for Defense Development)

1: 박사 (<https://orcid.org/0000-0002-1821-4432>), 2: 석 · 박사 통합과정 (<https://orcid.org/0000-0003-3479-2838>), 3: 석 · 박사 통합과정 (<https://orcid.org/0003-4558-2780>),

4: 본부장 (<https://orcid.org/0000-0003-1464-6358>), 5: 기술원 (<https://orcid.org/0000-0001-5726-8268>), 6: 책임연구원 (<https://orcid.org/0000-0001-7824-6914>),

7: 교수 (<https://orcid.org/0000-0001-6711-289X>)

· Manuscript received June 5, 2020 ; Revised June 20, 2020 ; Accepted August 1, 2020. (ID No. 20200605-051)

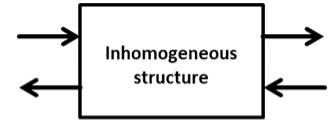
· Corresponding Author: Jong-Gwan Yook (e-mail: jgyook@yonsei.ac.kr)

성된 타공면이 존재하는 경우, 메쉬(mesh) 개수의 급격한 증가를 유발하여 해석 시간 및 용량 증가의 문제를 일으킨다. 이런 문제에 대한 대안으로서, 본 논문에서는 타공면을 등가 매질로 변환하는 방법에 대하여 연구하였다. 특히, 고출력 전자기파(EMP: electro-magnetic pulse) 위협에 대응하기 위해 주로 사용되는 철제 함체의 타공면을 대상으로 등가 매질 변환을 적용하였다.

고출력 전자기파는 일반적으로 강한 전자기파를 통해 전자기기의 고장이나 오작동을 일으키는 행위나 현상을 뜻한다. 대부분의 업무, 정보 처리, 제어 등이 전자기기로 이루어지는 현대 사회에서 EMP를 이용한 전자 공격은 매우 큰 위협으로 떠오르고 있다^{[1]~[3]}. 이러한 EMP 위협에 대응하기 위하여 주요 정보를 제어하고, 저장하는 컨트롤러와 서버를 철제 함체에 거치하는 방법이 많이 사용되고 있다. 일반적으로 함체에는 발열 등의 이유로 전·후면부에 타공면을 적용하기도 하는데, 이 경우 타공을 통한 고출력 전자기파의 함체 내부로의 침투 위험이 존재한다. 따라서 타공면이 포함된 함체를 모델링하고, 고출력 전자기파 침투 시 내부 전계 분포를 해석하여 함체에 거치된 전자기기에 가해질 EMP 위협에 대한 분석과 예측이 필요하다. 이때 등가매질로 변환된 타공면은 구조적으로 단순하기 때문에 메쉬 개수의 급격한 증가가 발생하지 않으며, 경계 조건을 활용하여 수식 계산을 통한 해석도 가능할 것으로 예상된다.

II. 등가매질 변환 방법

함체의 타공면은 사각·육각 타공이 주기적으로 반복되는 패턴을 갖는 도체로 구성된 비균질 매질 또는 구조(inhomogeneous medium/structure)로 볼 수 있다. 이러한 비균질 매질을 균질 매질로 등가 변환하는 방법은 여러 가지가 있는데, 본 논문에서는 Nicolson-Rose-Weir(NRW) 방법을 사용하였다^[4]. 이 방법에 대한 개념은 그림 1에 나타나 있듯이, 비균질 구조의 S -parameter로부터 전기적 특성인 굴절률(n)과 고유 임피던스(η)를 계산하고, 다시 이로부터 유전율(ϵ)과 투자율(μ)을 추출하는 형태이다. 이는 산란장 해석을 통해 얻을 수 있는 반사·투과 계수와 S -parameter 사이의 관계식을 역으로 이용하여 임의의 매



$$\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \rightarrow \begin{matrix} n \\ \text{and} \\ \eta \end{matrix} \rightarrow \begin{matrix} \mu_r \\ \text{and} \\ \epsilon_r \end{matrix}$$

그림 1. 비균질 구조의 전기적 특성 변환(추출) 과정

Fig. 1. Extraction process of electric properties from the inhomogeneous structure.

표 1. 비균질 구조의 전기적 특성 추출 관계식

Table 1. Equation using extraction of electric properties.

$S_{11}, S_{21} \rightarrow r, t$	$X = \frac{1 - S_{21}^2 + S_{11}^2}{2S_{11}}$ $r = X \pm \sqrt{X^2 - 1}$ $t = \frac{S_{11} + S_{21} - r}{1 - (S_{11} + S_{21})r}$
$r, t \rightarrow \eta, n$	$\eta = \eta_0 \frac{1+r}{1-r}, \quad n = \frac{\ln t}{jk_0 d}$
$\eta, n \rightarrow \mu_r, \epsilon_r$	$\mu_r = n \frac{\eta}{\eta_0}, \quad \epsilon_r = n \frac{\eta_0}{\eta}$

질의 S -parameter를 균일화 등가 매질의 유전율과 투자율로 변환하기 때문에 가능하다. S -parameter로부터 유전율과 투자율을 계산할 수 있는 관계식은 표 1과 같이 유도될 수 있으며, 이 단계별 관계식을 통하여 비균질 구조의 전기적 특성을 추출할 수 있다.

III. 육각 타공면의 등가매질 변환

본 논문에서 등가 매질 변환에 사용하는 타공면의 종류는 육각 타공면이며, 그 구조와 수치는 그림 2와 표 2에 나타나 있다. 전체 도체면에서 타공이 차지하는 면적에 따라 타공률(ventilation rate: vr)을 정의할 수 있으며, 이는 식 (1)에 따라서 계산된다.

$$vr = \left(\frac{w}{w+s} \right)^2 \times 100 (\%) \quad (1)$$

본 연구에서는 표 2에 명시된 바와 같이 64 %, 72.5 %, 81 %의 타공률을 갖는 육각 타공면을 대상으로 하여 연

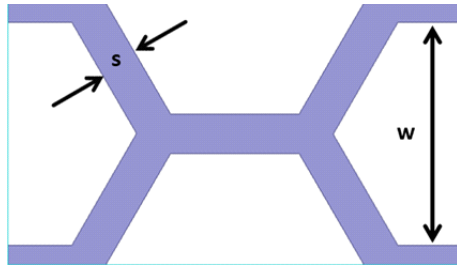


그림 2. 육각 타공면의 단위 격자
Fig. 2. Unit cell of honeycomb perforated metal surface.

표 2. 타공률에 따른 육각 타공면 구조의 수치
Table 2. Parameters of unit cell of honeycomb perforated metal surface by ventilation rate.

Ventilation rate	64 %	72.5 %	81 %
w	6.4 mm	6.8 mm	7.2 mm
s	1.6 mm	1.2 mm	0.8 mm

구를 진행하였다.

먼저 그림 2와 같은 단위 격자를 갖는 육각 타공면을 FEM 기반의 3차원 전자기 해석 툴인 ANSYS 사의 HFSS 를 사용하여 모델링하고, S -parameter를 계산하였다. 육각 타공면은 반복되는 패턴을 갖는 구조이기 때문에 floquet mode 해석 방법을 사용하면 매우 빠른 시간에 S -parameter를 계산할 수 있다.

그 후, 2장에서 유도한 비균질 매질의 전기적 특성 관계식에 전자기 해석 시뮬레이터로 계산하여 얻어낸 S -parameter 결과를 대입하면 유전율과 투자율을 계산할 수 있다. 이렇게 하여 도출된 육각 타공면의 전기적 특성은 그림 3에서 확인할 수 있으며, 이 때의 육각 타공면의 타공율은 64 %이다. 한 가지 특이한 점은 전기적 특성의 허수부를 담당하는 전기/전자 손신탄젠트(electric/magnetic loss tangent)가 음수 값을 갖는다는 것이다. 이러한 결과가 얻어진 이유는 육각 타공면은 주기적인 패턴을 띠는 도체로서 메타 물질로 볼 수 있으며, 메타 물질은 음의 전자기적 특성을 가질 수 있기 때문이다^[5]. 추가로, 비유전율은 저주파에서는 매우 큰 값을 가지며, 고주파로 갈수록 지수적으로 감소하는 특성을 나타내는데, 이는 고주파에서 더 많은 전파가 투과됨을 의미한다($\epsilon=326,140$ @ 100 MHz, $\epsilon=3,258.2$ @ 1 GHz).

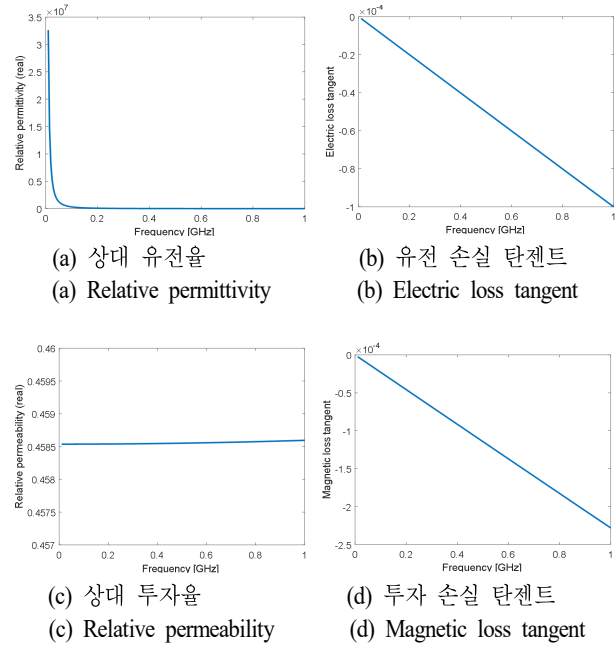


그림 3. 육각 타공면 등가매질의 전기적 특성(vr=64 %)
Fig. 3. Calculated electric properties of equivalent medium of the honeycomb perforated metal.

이렇게 계산된 등가 매질의 전기적 특성이 정확한지 확인하기 위하여 육각 타공면과 그 등가 매질 도체면의 S -parameter를 전자기 해석을 통해 계산하고 비교하였으며, 이 결과를 그림 4에 나타내었다. 이때 등가 매질 도체면의 전자기 해석도 HFSS의 floquet mode 해석 방법을 통해 수행되었다. 타공면과 등가 매질의 S_{11} , S_{21} 해석 결과가 해석 주파수 대역인 50 MHz~1 GHz에서 서로 일치하는 것을 확인할 수 있으며, 이를 통해 전기적 특성 추출을 통한 타공면의 등가 매질 변환이 잘 이루어졌다고 할 수 있다. 표 3은 두 해석 모델의 Mesh 개수와 해석 시간을 비교한 것이다. 두 모델 모두 작은 단위 격자를 floquet mode를 통해 매우 빠르게 해석하여 해석 시간에서는 큰 차이가 없었지만, Mesh 개수는 등가 매질 모델이 더 적었다. 따라서 이후 고출력 전자기파 입사에 따른 합체 내부 침투 전계 해석 시 넓은 면적의 타공면 대신에 등가 매질을 사용하여 좀 더 용이한 해석이 가능할 것으로 예상된다. 추가로, S_{21} 해석 결과를 보면 상대적으로 고주파로 갈수록 차폐효과가 감소하는데, 이는 타공면을 통해 파장이 짧은 고주파 신호가 상대적으로 많이 통과하기 때문이다^[6].

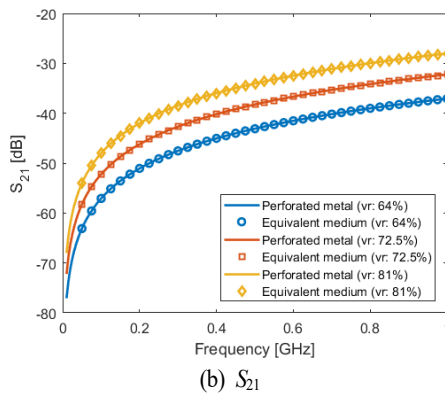
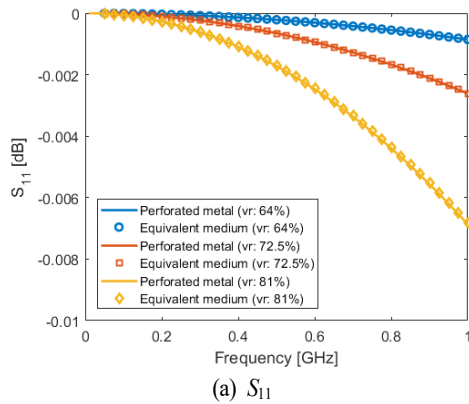


그림 4. 육각 타공면과 등가 매질의 S -parameter 결과
Fig. 4. Comparison of S -parameter between the honeycomb perforated surface model and equivalent medium.

표 3. 타공면과 등가매질 모델의 해석 결과 비교
Table 3. Comparison of analysis results of two models.

Ventilation rate (%)	The number of mesh		Computation time
	Perforated surface	Equivalent medium	
64	673	618	A few seconds
72.5	751	653	
81	878	707	

IV. 결 론

본 논문에서는 육각 타공면을 전기적 특성 추출을 통해 등가 매질로 변환하는 방법에 대하여 제안하고 검증하였다. 육각 타공면의 S -parameter를 이용하여 등가 매질

의 유전율과 투자율을 계산하였고, 타공면이 일종의 메타물질이기 때문에 음의 전자기적 특성이 나타남을 확인하였다. 마지막으로 육각 타공면과 등가 매질의 S -parameter 비교 분석을 통해 변환이 잘 이루어졌음을 확인하였다. 따라서 등가 매질 변환을 이용한 전자기 해석 방법은 고출력 전자기파의 합체 침투 상황 해석 시 새로운 대안으로 활용할 수 있을 것이다.

References

- [1] Y. C. Jeong, J. G. Yook, "Design and construction of high-power electromagnetics protection facilities," *The Proceeding of the Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 23, no. 4, pp. 3-15, Jul. 2012.
- [2] S. Y. Hyun, J. K. Du, W. Kim, and J. G. Yook, "Estimation of damage in electric power networks due to high power electromagnetic pulse," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 25, no. 7, pp. 757-766, Jul. 2014.
- [3] S. Kim, Y. Kim, S. Pang, and J. Yook, "Modified shielding effectiveness equation for novel multilayered waveguide-below-cutoff array," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 66, no. 9, pp. 3912-3920, Sep. 2018.
- [4] A. M. Nicolson, G. F. Ross, "Measurement of the intrinsic properties of materials by time-domain techniques," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 19, no. 4, pp. 377-382, Nov. 1970.
- [5] N. Engheta, R. W. Ziolkowski, *Metamaterials: Physics and Engineering Explorations*, Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, 2006.
- [6] S. Y. Hyun, J. K. Du, H. J. Lee, K. W. Lee, J. H. Lee, and, C. Jung et al., "Analysis of shielding effectiveness of reinforced concrete against high-altitude electromagnetic pulse," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 56, no. 6, pp. 1488-1496, Dec. 2014.