

<http://dx.doi.org/10.7236/IIBC.2015.15.2.65>

IIBC 2015-2-10

접지된 2개 유전체층 위의 완전도체띠 격자구조에 의한 TE 산란에 관한 연구

A Study on TE Scattering by a Conductive Strip Grating Over Grounded Two Dielectric Layers

윤익중*

Uei-Joong Yoon *

요 약 본 논문에서는 접지된 2개의 유전체층 위의 완전도체띠 격자구조에 의한 TE (transverse electric) 산란 문제를 전자과 수치해석 방법으로 알려진 PMM (point matching method)를 이용하여 해석하였다. 경계조건들은 미지의 계수를 구하기 위하여 이용하였고, 산란 전자계는 Floquet 모드 함수의 급수로 전개하였고, 도체띠의 해석을 위해 완전도체 경계조건을 적용하였다. 최소값을 가지는 변곡점들의 대부분의 반사전력은 입사각 이외의 다른 방향으로 산란된다. 완전도체띠의 폭과 주기, 2개 유전층의 비유전율과 두께 및 입사각에 대해 정규화된 반사전력을 계산하였다. 제안한 방법의 수치결과들은 기존의 FGMM (fourier galerkin moment method)를 이용한 수치해석 결과들과 비교하여 매우 잘 일치하였다.

Abstract In this paper, the solutions of TE (transverse electric) scattering problems by a conductive strip grating over grounded two dielectric layers are analyzed by applying the PMM (point matching method) known as a numerical method of electromagnetic field. The boundary conditions are applied to obtain the unknown field coefficients, the scattered electromagnetic fields are expanded in a series of Floquet mode functions, and the conductive boundary condition apply to analysis of conducting strip. The most normalized reflected powers of the sharp variations in minimum values are scattered in direction of the other angles except incident angle. The numerical results for normalized reflected power are analyzed by according as the width and spacing of conductive strip, the relative permittivity and thickness of the two dielectric layers, and incident angles. The numerical results of present numerical analysis are shown in good agreement compared to those of the existing papers using FGMM (fourier galerkin moment method).

Key Words : TE scattering, Conductive boundary condition, Point matching and Fourier galerkin moment method.

1. 서 론

유전체 환상의 스트립 회절격자(strip grating)에 의한 산란문제는 광학, 필터, 레이더, 안테나 및 전자기학의 이

론 및 응용분야에서 중요시 되었고, 광학에서는 이러한 구조들은 전송회절격자로 널리 이용되어 왔으며, reflector antenna systems, wave polarizers, artificial dielectrics, side lobe suppression angular filter 등 반사

*충신회원, 가천대학교 의용생체공학과
접수일자 : 2015년 2월 24일, 수정완료 : 2015년 3월 24일
게재확정일자 : 2015년 4월 10일

Received: 24 February, 2015 / Revised: 24 March, 2015 /
Accepted: 10 April, 2015

*Corresponding Author: ujyoon@gachon.ac.kr
Dept. of Biomedical Engineering, Gachon University, Korea

나 투과 현상을 취급하기 위해서 여러 연구자들에 의해서 많은 관심을 가져왔다^{[1]-[13]}. 격자구조에 도체를 사용한 기본 문제로서 Richmond는 자유공간상에서 스트립에 유도되는 미지의 유도전류를 간단히 Fourier 급수로 전개하여 FGMM (fourier galerkin moment method)을 이용하여 수치해석하였으며^[2], 자유공간상에서 저항띠를 가진 경우는 파수영역에서 SGMM(spectral galerkin moment method)을 이용하여 수치해석하였다^{[3][4]}. 또한 자유공간 상에서 도체띠에 대한 TM 산란문제에 대해 급속한 수렴해에 대해 취급하였다^[5].

도체띠(conductive strip) 격자구조에 의한 산란 문제에 대해 반사를 유리하게 하기 위하여 유전체 접지층 위에 도체띠를 가지는 경우에 대해 수치방법 중의 하나인 PMM(point matching method)을 이용하여 수치 계산하였으며^[6], 접지 유전체층의 TM 산란 문제에 대해 급속한 수렴 해를 취급하였다^[7].

TE(transverse electric)산란 문제를 취급함에 있어, 접지 유전체층 위의 저항띠에 유도되는 전류밀도를 sine 함수와 cosine 함수로 나누어 홀수 항과 짝수 항으로 구분해서 수치해석하였으며^[8], 접지된 2개의 유전체층 위의 완전도체띠의 경우 FGMM을 이용하여 간단한 지수함수를 사용하여 수치계산하였고^[9], 모서리 경계조건을 만족하는 급속한 수렴해에 대해 TE 및 TM 산란 문제를 해석하였다^{[10][11]}, 또한 유전체 격자구조에서 전자기과의 산란 문제에 대해 근사화 이론을 이용하여 해석하였고^[12], 주기적인 유전체 층을 사용한 안테나용 주파수 선택 반사기를 설계한 바 있다^[13].

본 논문에서는 TE산란 문제의 경우, 접지된 2개의 유전체층 위에 매우 얇은 완전도체띠가 주기적으로 배열되어 있을 때 수치해석 방법의 일종인 PMM을 이용하여 정규화된 기하광학적 반사전력의 해(solutions)를 구하는 것이 본 논문의 목적이며, 본 논문의 수치계산 결과를 검증하기 위하여 기존 논문의 FGMM을 이용한 수치계산 결과와 비교하여 본 논문의 타당성을 입증하고자 한다.

II. 문제 구조의 전자계 수식전개

문제의 구조는 그림 1과 같이 TE 평면파가 가장자리에 나란하게 ϕ 의 각도로 비스듬히 입사하고, 접지된 유전체 층 위에 완전도체띠가 y 방향으로 무한하게 배열

되어 있다. 완전도체띠의 격자는 $x-y$ 평면상에 위치하고 있으며, x 방향으로 주기적으로 배열되어 있다. 그림 1에서 영역 1과 2의 비유전율(relative permittivity)은 ϵ_{r1} , ϵ_{r2} [F/m]이며, 스트립 주기는 s , 스트립 폭은 w 및 영역 1과 2의 유체층의 두께는 t_1 및 t_2 이며, 단위는 파장 $[\lambda]$ 이다.

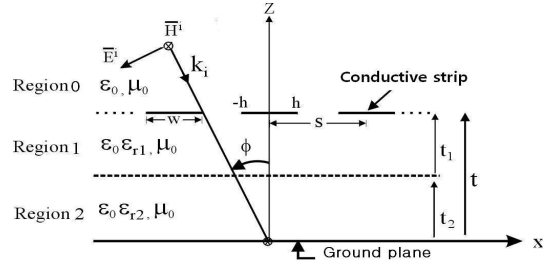


그림 1. 문제의 구조에 입사하는 TE 평면파
Fig. 1. Geometry of the problem and incident TE plane wave

그림 1과 같은 구조에 대하여 영역 0에 입사하는 자계 \vec{H}^i 및 전계 \vec{E}^i 는 다음과 같이 쓸 수 있다^{[6][9]}.

$$\vec{H}^i = \hat{a}_y H_0 e^{-j\beta_0 x} e^{j\gamma_0 z} \quad (1)$$

$$\vec{E}^i = -\hat{a}_x \frac{H_0 \gamma_0}{\omega \epsilon_0} e^{-j\beta_0 x} e^{j\gamma_0 z} - \hat{a}_z \frac{H_0 \beta_0}{\omega \epsilon_0} e^{-j\beta_0 x} e^{j\gamma_0 z} \quad (2)$$

식 (1)과 (2)에서 \hat{a}_x , \hat{a}_y 및 \hat{a}_z 는 x, y 및 z 방향의 단위벡터이며, 매질의 전파상수(propagation constant) $k_0 = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$, 고유 임피던스 $\eta_0 = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0}$, μ_0 와 ϵ_0 는 자유공간의 투자율 및 유전율, $\beta_0 = k_0 \sin \phi$, $\gamma_0 = k_0 \cos \phi$, H_0 는 입사 자계의 진폭으로서 1로 정규화하였으며, 편의상 앞으로 모든 수식전개시 생략하기로 한다.

영역 0에서 산란자계 \vec{H}^s 및 산란전계 \vec{E}^s 는 다음과 같은 평면파(plane wave)의 합으로 표시할 수 있다^{[6][9]}.

$$\vec{H}^s = \hat{a}_y \sum_{n=-N}^N A_n e^{-j\beta_n x} e^{-j\gamma_n(z-t)} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \overline{E^s} = & \hat{a}_x \sum_{n=-N}^N \frac{A_n \gamma_n}{\omega \epsilon_0} e^{-j\beta_n x} e^{-j\gamma_n(z-t)} \\ & - \hat{a}_z \sum_{n=-N}^N \frac{A_n \beta_n}{\omega \epsilon_0} e^{-j\beta_n x} e^{-j\gamma_n(z-t)} \end{aligned} \quad (4)$$

식 (3)과 식 (4)에서 A_n 는 구해야 할 미지의 계수이며, $\beta_n = \beta_0 + 2\pi n/s$, γ_n 는 전파모드(propagation mode)와 감쇠모드(evanescent mode)로 표시할 수 있다.

$$\gamma_n = \begin{cases} \sqrt{k_0^2 - \beta_n^2}, & k_0^2 > \beta_n^2 \\ -j\sqrt{\beta_n^2 - k_0^2}, & k_0^2 < \beta_n^2 \end{cases} \quad (5)$$

영역 1과 2에서 전체 자계 $\overline{H_i^t}$ 및 전계 $\overline{E_i^t}$ 는 다음과 같이 무한급수의 합으로 표현할 수 있다^{[6][9]}.

$$\overline{H_i^t} = \hat{a}_y \sum_{n=-N}^N [B_{ni} e^{-j\beta_n x} e^{-j\eta_{ni} z} + C_{ni} e^{-j\beta_n x} e^{j\eta_{ni} z}] \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \overline{E_i^t} = & \hat{a}_x \sum_{n=-N}^N \frac{B_{ni} \eta_{ni}}{\omega \epsilon_0 \epsilon_{ri}} e^{-j\beta_n x} e^{-j\eta_{ni} z} \\ & + \frac{C_{ni} \eta_{ni}}{\omega \epsilon_0 \epsilon_{ri}} e^{-j\beta_n x} e^{j\eta_{ni} z} \\ & - \hat{a}_z \sum_{n=-N}^N \frac{B_{ni} \beta_n}{\omega \epsilon_0 \epsilon_{ri}} e^{-j\beta_n x} e^{-j\eta_{ni} z} \\ & + \frac{C_{ni} \beta_n}{\omega \epsilon_0 \epsilon_{ri}} e^{-j\beta_n x} e^{j\eta_{ni} z} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 B_{ni} 와 C_{ni} 는 구해야 할 미지의 계수, i 는 영역 1과 2를 의미하며, η_{ni} 는 다음과 같이 2가지 모드로 구분하여 표시할 수 있다.

$$\eta_{ni} = \begin{cases} \sqrt{k_i^2 - \beta_n^2}, & k_i^2 \geq \beta_n^2 \\ -j\sqrt{\beta_n^2 - k_i^2}, & k_i^2 < \beta_n^2 \end{cases} \quad (8)$$

식 (8)에서 $k_i = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0 \epsilon_{ri}} = k_0 \sqrt{\epsilon_{ri}}$, i 는 영역 1과 2를 의미하며, ϵ_{ri} 는 영역 1과 2의 비유전율이다.

지금까지 사용된 미지의 계수를 구하기 위해 경계조건을 적용한다. 우선 $z=0$ 인 접지평면(ground plane)에서 접선성분의 전체전계는 사라져야 하며, 영역 1과 2의 경계면인 $z=t$ 에서 접선성분의 자계 및 전계는 연속이

므로 이들의 경계조건들을 정리하면 B_{n1} 를 A_n 의 함수로 표현할 수 있다^[9].

$$B_{n1} = \frac{\epsilon_{r1}(A_n \gamma_n - \gamma_0 e^{j\gamma_0 t} \delta_n)}{\eta_{n1}(e^{-j\eta_{n1} t} - p_{n1} e^{j\eta_{n1} t})} \quad (9)$$

$$p_{n1} = \frac{1 + j \frac{\epsilon_{r1} \eta_{n2}}{\epsilon_{r2} \eta_{n1}} \tan(\eta_{n2} t_2)}{1 - j \frac{\epsilon_{r1} \eta_{n2}}{\epsilon_{r2} \eta_{n1}} \tan(\eta_{n2} t_2)} \cdot e^{-j2\eta_{n1} t_2} \quad (10)$$

식 (9)에서 δ_n 는 $n=0$ 일 때만 1이고, $n \neq 0$ 의 경우는 0인 Kronecker delta 함수이다.

그리고 $z=t$ 인 도체피의 경계면에서 입사전계와 산란전계의 합인 영역 0에서의 전체 전계 $\overline{E_0^t}$ 는 사라져야 하므로 식 (2)와 식 (4)를 이용하여 정리하면 도체피에서 만족하는 A_n 에 관한 식을 얻을 수 있다.

$$\sum_{n=-N}^N A_n \gamma_n e^{-j\beta_n x} = \gamma_0 e^{-j\beta_0 x} e^{j\gamma_0 t}, \quad 0 \leq x \leq w \quad (11)$$

또한, $z=t$ 인 경계면의 도체피 이외의 영역(slot)에서 접선성분의 자계성분은 연속이므로 식 (1), (3), (6) 및 식 (9)를 이용하여 정리하면 A_n 에 관한 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \sum_{n=-N}^N A_n (\gamma_n p_{n2} - 1) e^{-j\beta_n x}, \quad w < x \leq s \quad (12) \\ = e^{-j\beta_0 x} e^{j\gamma_0 t} (1 + \gamma_0 \delta_n p_{n2}) \end{aligned}$$

$$p_{n2} = \frac{\epsilon_{r1}}{\eta_{n1}} \frac{(e^{-j\eta_{n1} t} + p_{n1} e^{j\eta_{n1} t})}{(e^{-j\eta_{n1} t} - p_{n1} e^{j\eta_{n1} t})} \quad (13)$$

따라서 식 (11)과 식 (12)는 그림 1에서 한 주기 구간인 $0 \leq x \leq s$ 의 범위에서 만족하는 수식이 된다. 미지의 계수 A_n 을 구하기 위해서 $(2N+1)$ 개의 등 간격으로 나누어 수치계산하게 되며, 수치해석시 식 (11)과 식 (12)에 대해서 Dirac delta 함수와의 내적(inner product)을 수행하고, 매트릭스를 역변환을 수행한 후, $n=0$ 인 정규화된 기하광학적 반사전력(reflected power of zeroth order mode) $|A_0|^2$ 을 계산할 수 있다.

III. 수치계산 결과 및 검토

본 논문에서는 TE 산란 문제의 경우, 접지된 2개 유전체층 위에 완전도체띠가 주기적으로 배열되어 있을 때 전자파 수치해석 방법인 PMM을 이용하여 기하광학적 반사전력을 계산하고, FGMM^[9]을 이용한 기존 논문의 수치계산 결과들과 비교하여 수치해석의 타당성을 검증하는 것이 본 논문의 목적이다.

식 (11)과 식 (12)를 이용하여 미지의 계수 A_n 을 구하기 위해서는 $(2N + 1)$ 개의 등 간격으로 나누어 수치계산해야 한다. 따라서 본 논문에서는 식 (11)과 식 (12)를 해결하기 위하여 $n = [-N:N]$ 으로 $N = 100$ 을 사용하였으며, 정방향렬의 역변환을 수행하여 정규화된 반사전력을 계산하였다. 또한 각 유전체층의 비유전율 ϵ_{r1} 및 ϵ_{r2} 의 단위 [F/m]와 도체띠의 폭(w), 주기(s) 및 유전층의 두께 t_1 및 t_2 의 단위는 파장 [λ]으로 편의상 단위는 생략하기로 한다.

그림 2는 수직입사시 격자상수 $s = 1.2$, $t_1 = 0.2$, $t_2 = 0.2$, 비유전율 $\epsilon_{r1} = 1$ 일 때, ϵ_{r2} 의 변화에 따른 정규화된 반사전력을 계산한 것으로, 범례에 표시된 선들인 실선, 점선, 끊어진 실선, 2점 쇄선들은 FGMM을 적용한 기존 논문^[9]의 수치계산 결과이며, 또한 범례에 표시된 기호들인 “●, ○, ▼, △” 는 동일한 격자상수를 사용했을 때 본 논문에서 제안한 PMM을 이용한 수치계산 결과로서, 계산 결과가 거의 일치하여 수치해석의 타당성을 검증하였으며, 또한 본 논문은 기존 논문^[6]의 접지된 1개의 유전체층 문제를 PMM을 이용하여 접지된 2개의 유전체층 문제로 확장 수치해석한 것과 동일하다.

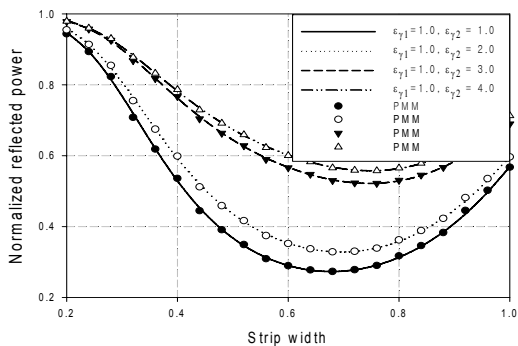


그림 2. 수직입사시 스트립 폭에 대한 반사전력의 변화
Fig. 2. Variation of normalized reflected power for strip width at normal incidence

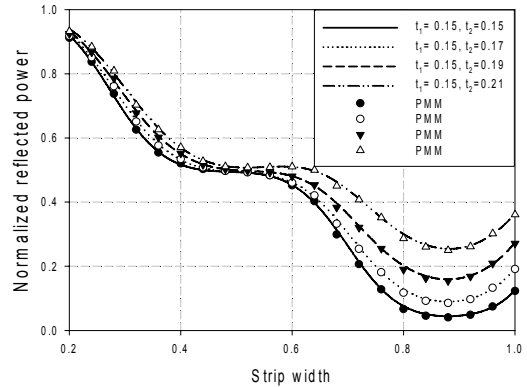


그림 3. 입사각 60도일 때, 스트립 폭에 대한 반사전력의 변화
Fig. 3. Variation of normalized reflected power for strip width at incident angle $\phi = 60^\circ$

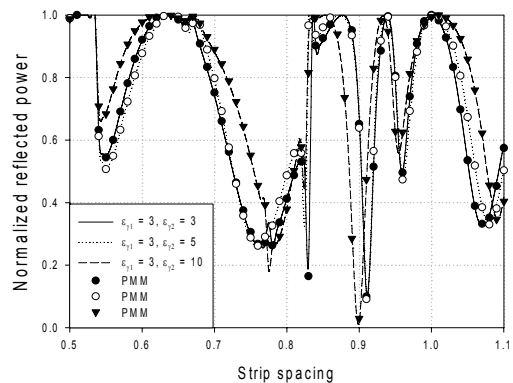


그림 4. 입사각 60도일 때, 스트립 주기 대한 반사전력의 변화
Fig. 4. Variation of normalized reflected power for strip spacing at incident angle $\phi = 60^\circ$

그림 4는 입사각이 60도일 때, 격자상수 $w = s$, $t_1 = t_2 = s/2$, $\epsilon_{r1} = 3$ 일 때, ϵ_{r2} 의 변화에 따른 격자 주기 s 에 대한 반사전력을 계산한 결과로서 범례에 표시된 기호들은 그림 2에서 이미 언급하였으며, 기존 논문^[9]의 계산결과와 거의 일치하였으며, 급변점들은 공진현상에 기인한 것으로 입사각 이외의 다른 방향으로 산란된다는 것을 의미하며, 이는 전파모드에서 감쇠모드로, 감쇠모드에서 전파모드로 전환될 때 발생하는 것으로 ‘Wood’s anomaly’라고 언급한 바 있다^[6].

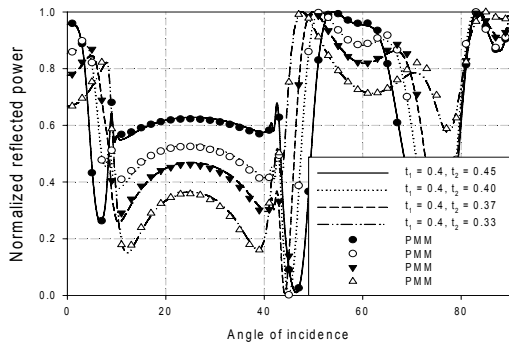


그림 5. 입사각에 대한 반사전력의 변화
 Fig. 5. Variation of normalized reflected power for incident angles

그림 5에서 적용한 격자상수들은 $s = 1.2$, $w = 0.7s$, $\epsilon_{r1} = 1$, $\epsilon_{r2} = 2$, $t_1 = 0.4$ 일 때, t_2 의 변화에 대해 입사각에 따른 기하광학적 반사전력을 계산하였다. 영역 2의 유전체층의 두께가 클수록 10도와 40도 사이 및 50도와 70도 사이 부근에서 전반적으로 반사전력이 크게 나타났고, 범례에 표시된 기호들은 그림 2에서 이미 언급하였으며, 본 논문의 PMM의 수치계산 결과와 기존 논문^[9]의 계산결과와 거의 일치하여 수치해석의 타당성을 입증하였다.

IV. 결론

본 논문에서는 TE산란 문제의 경우, 접지된 2개의 유전체층 위에 완전도체띠가 주기적으로 배열되어 있는 구조에 대하여 수치해석 방법인 PMM을 이용하여 수치해석의 해를 구하는 것이 목적이며, 수치해석의 타당성을 검증하기 위하여 입사각, 유전체 층의 비유전율 및 두께를 변화시켜 계산한 기하광학적 반사전력을 계산했을 때, 기존 논문의 FGMM을 이용한 수치계산한 결과와 비교하여 거의 일치하여 수치해석의 타당성을 검증하였다.

FGMM을 이용하여 수치해석할 경우에는 기저함수(basis function)와 가중함수(weighting function)를 이용하여 복잡한 과정을 거쳐서 수식 전개를 행하여야 하나, PMM으로 수치해석할 경우에는 기저함수와 가중함수가 필요하지 않기 때문에 수치해석의 수식 전개시 유리하다.

앞으로 접지된 다층 유전체층 위에서의 완전도체띠 및 저항띠의 격자구조와 접지된 2중 유전체층 사이의 완

전도체띠 및 저항띠의 격자구조에 의한 TE 및 TM 산란 문제에 대해 PMM을 이용하여 수치해석할 수 있을 것으로 기대되며, 또한 기존의 FGMM의 수치계산 결과와 비교할 수 있을 것으로 기대되어 지속적인 연구가 필요하다.

References

- [1] M. Ando and K. Takei, "Reflection and Transmission Coefficient of a Thin Strip Grating for Antenna Application," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. AP-35, No.4, pp.367-371, Mar. 1987.
- [2] J. H. Richmond, "On the Edge Mode in the Theory of TM Scattering by a Strip or Strip Grating," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. AP-28, pp. 883-887, Sept. 1980.
- [3] R. C. Hall and R. Mittra, "Scattering from a Periodic Array of Resistive Strips," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. AP-33, pp. 1009-1011, Sept. 1985.
- [4] R. C. Hall, R. Mittra, and K. M. Mitzner, "Analysis of Multilayered Periodic Structure Using Generalized Scattering Matrix Theory," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. AP-36, pp. 511-517, Sept. 1988.
- [5] U. J. Yoon, "The Fast Convergent Solution of E-polarized Reflection Coefficient by a Perfect Conductor Strip Grating," Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science, Vol. 6, No. 1, pp. 10-16, Mar. 1995.
- [6] H. A. Kalhor, "Electromagnetic Scattering by a Dielectric Slab Loaded with a Periodic Array of Strips Over a Grounded Plane," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. AP-36, No. 1, pp. 147-151, Jan. 1988.
- [7] Y. K. Cho, et al, "Analysis of Electromagnetic Scattering by Periodic Strips on Grounded Dielectric Slab," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Symposium Digest, Vol 1, pp. 511-517, 1995.

- [8] Y. S. Choi and S. I. Yang, "Analysis of the Electromagnetic Scattering of Resistive Strip Grating with Uniform Resistivity on a Grounded Dielectric Layer. - H-Polarization case," Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences, Vol. 31, No. 3A, pp. 321-327, Mar. 2006.
- [9] U. J. Yoon, "Solution of TE Scattering by a Perfectly Conducting Strip Grating Over the Grounded Two Dielectric Layers Applying Fourier-Galerkin Moment Method," Journal of Korea Navigation Institute, Vol. 16, No. 4, pp. 635-640, Aug. 2012.
- [10] U. J. Yoon, "Solution of TE Scattering by a Conductive Strip Grating Over the Grounded Two Dielectric Layers with Edge Boundary Condition," Journal of Advanced Navigation Technology, Vol. 17, No. 2, pp. 183-188, Apr. 2013.
- [11] U. J. Yoon, "Solution of TM Scattering by a Conductive Strip Grating Over the Grounded Two Dielectric Layers with Edge Boundary Condition," Journal of Advanced Navigation Technology, Vol. 17, No. 4, pp. 429-434, Aug. 2013.
- [12] M. N. Kim and G. S. Chae, "Analysis of Scattering of Electromagnetic Wave in Dielectric Periodic Media," Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society(JKAIS), Vol. 5, No. 5, pp. 385-388, 2004.
- [13] K. C. Ho, "Design of Frequency-Selective Reflector for Large Reflecting Antennas using a Periodic Dielectric Layer," The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication(JIIBC), Vol. 10, No. 1, pp. 33-38, 2010.

저자 소개

윤 의 중(중신회원)



- 1993년 : 숭실대학교 대학원 전자공학과 공학박사
- 1997년 6월 ~ 1997년 8월 : Bemidji State University in Minnesota (USA), 미국방문연수
- 2006년 3월 ~ 2012년 2월 : 가천대학교 의용생체공학과 학과장
- 2008년 7월 ~ 2012월 1월 : 가천대학교 학생처장
- 2006년 3월 ~ 현재 : 가천대학교 의용생체공학과 교수
<주관심분야 : 전자파산란 수치해석, 마이크로파 회로, 생체 모니터링 시스템 등>