

접지된 유전체 위의 주기적 스트립 격자구조에서 TE편파의 산란현상

(Scattering phenomena of TE polarization on a periodic strip grating over a grounded dielectric slab)

홍재표*, 조웅희**
(Jae Pyo Hong*, Ung Hee Cho**)

요약 접지된 유전체 슬랩 위에 주기적으로 스트립 격자가 놓여 있는 주기구조에서 TE 편파된 평면파에 대한 전자파 산란현상을 이론적으로 해석하였다. 제시된 구조를 이론적으로 해석하여 수치 해석한 결과인 유체층의 두께 변화에 대한 반사파 전력과 모드별 계수, 입사각의 변화에 대한 반사파 전력 및 스트립상에 유기되는 전류 등을 제시하였다. 그리고 제시된 구조에서 관찰되는 Bragg blazing 현상에 관해서 상세히 기술하였다.

핵심주제어 : 주기적 스트립격자, TE, 산란

Abstract A theoretical method for the TE polarized electromagnetic scattering on a periodic strip grating over a grounded dielectric slab is considered. The numerical results for an analysis of the plane wave scattering from the structure are presented such as normalized mode amplitude and relative reflected power against normalized dielectric slab height, relative reflected power against angle of incidence and distribution of strip current density. Detailed discussions on the Bragg blazing phenomena observed in the geometry are given.

Key Words : periodic strip grating, TE, Scattering

1. 서론

접지된 유전체층 위에 주기적으로 스트립 격자가 놓여 있는 주기구조에 대하여 많은 연구가 진행되고 있다[1-6]. 이러한 주기적인 스트립 격자구조에 대한 대부분의 연구는 누설파 안테나(leakywave antenna) 관점[3,4]에서 진행되거나 반사격자(reflection grating) 관점[5,6]에서 연구되는 등 각각 서로 다른 관점에서 연구들이 진행되어 왔다. 그러나 최근에는 누설파 안테나 관점과 반사격자 관점과의 서로 연관성에 대한 연구결과들[7-9]이 발표되고 있다.

주기적인 스트립 격자구조를 반사격자 관점에서 연구한 논문들의 반사격자의 구조로는 구형 격자

(rectangular groove) 구조와 삼각형 격자(echelette grating) 구조 및 정현형 격자(sinusoidal grating) 구조 등이 있다. 그러나 이러한 격자구조들은 제작하는데 어려움이 있거나 설치하는데 비용이 많이 드는 단점들이 있으므로 이들 구조에 대한 대체용 구조가 필요하다. 그래서 본 논문에서 제시한 구조가 대체용으로 활용되는데, 특히 이 구조는 전술한 기존의 여러 가지 격자구조에 비하여 다양한 산란특성을 나타내고 있다[7].

주기적 스트립 격자구조를 누설파 안테나 관점에서 보면 격자구조의 여러 가지 파라미터, 예를 들면 스트립의 주기, 스트립의 폭, 유전체의 비유전율 및 유전체층의 두께 등의 변화에 따라 안테나의 다양한 빔폭과 복사각도를 얻을 수 있다.

본 논문에서는 접지된 유전체층 위에 주기적으로

* 경일대학교 전자정보공학과
** 경동정보대학 정보통신과

스트립 격자가 놓여 있는 주기구조에서 격자 내부와 외부의 경계면에서 경계조건을 부과하고, 스트립 표면의 유기전류를 미지수로 하는 행렬방정식을 유도하였다. 이를 해석하기 위하여 수치해석을 이용하였고, 반사파 전력과 스트립 표면의 유기전류 및 모드별 계수를 구하였다. 본 논문에서 제시한 이론적인 해석 방법은 임의의 주기구조에 대하여 적용이 가능하다. 또한 본 연구에서 다루는 접지된 유전체층 위에 주기적으로 스트립이 놓여 있는 격자구조는 주파수 분할 다중화기(frequency division multiplexer)나 주파수 스캐너(frequency scanner) 및 DBR (distributed Bragg reflection) 발진기(oscillator) 등의 설계에 활용이 가능하다.

2. 본 론

접지된 유전체층 위에 스트립이 주기적으로 놓여 있는 격자구조에 TE 편파된 평면파가 입사할 때 스트립의 구조와 좌표계를 나타내면 그림 1과 같다. 그림 1에서 유전체의 아래에는 접지면이 있고, 유전체층은 손실이 없는 무손실 유전체로 채워져 있으며, 유전율은 $\epsilon_0\epsilon_r$ 이고, 투자율은 μ_0 이고, 유전체층의 높이는 h 이다. 그리고 유전체 층위에 주기적으로 놓여 있는 스트립의 주기는 d 이고, 폭은 a 이다. 또 스트립은 x 축과 평행하게 놓여 있으며, 유전체층 위의 공간영역을 영역 I로 두었으며, 유전체층의 내부를 영역 II로 두었다.

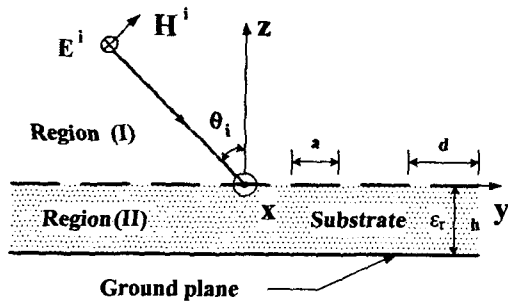


그림 1. 주기적인 스트립 격자구조

제시된 구조에서 TE 편파된 평면파의 입사파는

$$\underline{E}^i = \underline{x}_0 E_0 e^{-j\beta_0 y} e^{j\gamma_0 z} \quad (1)$$

$$\underline{H}^i = -\underline{y}_0 \frac{\gamma_0}{\omega\mu_0} E_0 e^{-j\beta_0 y} e^{j\gamma_0 z} - \underline{z}_0 \frac{\beta_0}{\omega\mu_0} E_0 e^{-j\beta_0 y} e^{j\gamma_0 z} \quad (2)$$

와 같이 표현된다. 여기서 $\beta_0 = k_0 \sin \theta_i$, $\gamma_0 = k_0 \cos \theta_i$, $k_0 = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$ 이다.

영역 I에서 스트립상의 유기전류(induced current)에 의한 산란 전자장을 공간 조화함수(space harmonics)의 선형적인 합으로 표현하면 각각 다음 식과 같다.

$$\underline{E}^{S(I)} = \underline{x}_0 E_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n e^{-j\beta_n y} e^{-j\gamma_n z} \quad (3)$$

$$\underline{H}^{S(I)} = \underline{y}_0 E_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{\gamma_n}{\omega\mu_0} A_n e^{-j\beta_n y} e^{-j\gamma_n z} - \underline{z}_0 E_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n \frac{\beta_n}{\omega\mu_0} e^{-j\beta_n y} e^{-j\gamma_n z} \quad (4)$$

여기서 $\beta_n = \beta_0 + 2n\pi/d$, $\gamma_n = \sqrt{k_0^2 - \beta_n^2}$ 이고, A_n 은 n 차 공간 조화함수의 미지계수이다.

영역 II에서의 산란 전자장도 공간 조화함수의 선형적인 합으로 표현할 수 있으며, $z = -h$ 에서 경계조건을 부과하여 정리하면 다음과 같다.

$$\underline{E}^{S(II)} = \underline{x}_0 E_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} B_n (e^{j\gamma_n z} - e^{-j\gamma_n z}) e^{-j\beta_n y} \quad (5)$$

$$\underline{H}^{S(II)} = -\underline{y}_0 E_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{\gamma_n}{\omega\mu_0} B_n (e^{j\gamma_n z} + e^{-j\gamma_n z}) e^{-j\beta_n y} - \underline{z}_0 E_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{\beta_n}{\omega\mu_0} B_n (e^{j\gamma_n z} - e^{-j\gamma_n z}) e^{-j\beta_n y} \quad (6)$$

여기서 $\gamma_n = \sqrt{\epsilon_r k_0^2 - \beta_n^2}$ 이고, B_n 은 미지의 계수이다.

두 영역에서 자계의 불연속으로 인하여 스트립상에 유기되는 전류를 Chebyshev 다항식의 급수와 가장자리 조건(edge condition)을 만족하는 함수의 곱의 합 형태로 나타낼 수 있으며, 이를 표현하면 식 (7)과 같다.

$$I = x_0 e^{-j\beta_0 y} \sum_{\ell=0}^{\infty} f_{\ell} \frac{T_{\ell}(2y/a)}{\sqrt{1-(2y/a)^2}} \quad |y| < \frac{a}{2} \quad (7)$$

여기서 T_{ℓ} 은 1종의 Chebyshev 다항식을 의미하고, f_{ℓ} 은 미지의 전개계수이다.

슬롯에서 전계의 접선성분의 연속조건과 스트립에서 자계의 접선성분의 불연속조건 및 스트립에 유기되는 전류로부터 다음의 표현식을 얻을 수가 있다.

$$E_o \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{1}{\omega \mu_o} (j\gamma_{n2} \cot \gamma_{n2} h - \gamma_{n1}) A_n e^{-j \frac{2n\pi}{d} y} = \begin{cases} \sum_{\ell=0}^{\infty} f_{\ell} \frac{T_{\ell}(2y/a)}{\sqrt{1-(2y/a)^2}} & , \quad |y| < \frac{a}{2} \\ 0 & , \quad \frac{a}{2} < |y| < \frac{d}{2} \end{cases} \quad (8)$$

또 식 (8)의 양변에 $e^{j \frac{2n\pi}{d} y}$ 를 곱하여 한 주기에 걸쳐 적분하여 정리하면 n차 공간 조화함수의 미지계수 A_n 에 관한 식을 아래와 같이 얻을 수 있다.

$$A_n = \frac{k_o \eta_o}{E_o (j\gamma_{n2} \cot \gamma_{n2} h - \gamma_{n1}) d} \sum_{\ell=0}^{\infty} f_{\ell} H_{\ell n}^* \quad (9)$$

여기서

$$H_{\ell n} = \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \frac{T_{\ell}(2y/a)}{\sqrt{1-(2y/a)^2}} e^{-j \frac{2n\pi}{d} y} dy$$

$$= \begin{cases} \frac{\pi a}{2} (j)^{\ell} J_{\ell} \left(-\frac{n\pi a}{d} \right) & , \quad n < 0 \\ \frac{\pi a}{2} & , \quad n = 0 \text{ and } \ell = 0 \\ 0 & , \quad n = 0 \text{ and } \ell \neq 0 \\ \frac{\pi a}{2} (-j)^{\ell} J_{\ell} \left(\frac{n\pi a}{d} \right) & , \quad n > 0 \end{cases}$$

이고, asterik(*)은 복소공액을 나타내며, J_{ℓ} 은 ℓ 차

의 Bessel함수이며, $\eta_o = \sqrt{\mu_o/\epsilon_o}$ 이다.

영역 I에서 전체 전계는

$$\begin{aligned} E^{(I)} = x_o (& E_o e^{-j\beta_o y} e^{j\gamma_o z} \\ & + E_o R e^{-j\beta_o y} e^{-j\gamma_o z} \\ & + E_o \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n e^{-j\beta_n y} e^{-j\gamma_n z}) \end{aligned} \quad (10)$$

과 같이 표현된다. 여기서 R은 접지된 유전체 슬랩에서의 전계에 대한 반사계수이다.

스트립 상에서 전계의 접선성분에 대한 경계조건으로부터 다음 식을 얻을 수 있다.

$$E_o (1 + R + \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n e^{-j \frac{2n\pi}{d} y}) = 0, |y| \leq \frac{a}{2} \quad (11)$$

식 (11)에 식 (9)를 대입한 후 $T_{\ell}(\frac{2y}{a})/\sqrt{1-(\frac{2y}{a})^2}$ 을 곱하여 스트립 영역에 대해 적분하여 정리하면 다음과 같은 행렬 방정식을 얻을 수 있다.

$$\sum_{\ell=0}^{\infty} f_{\ell} Z_{i\ell} = E_i \quad , \quad i=0, 1, 2, \dots \quad (12)$$

여기서

$$Z_{i\ell} = -\frac{2k_o \eta_o}{(1+R)\pi d a} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{H_{\ell n}^* H_{in}}{j\gamma_{n2} \cot \gamma_{n2} h - \gamma_{n1}}$$

$$E_i = \begin{cases} E_o & , \quad i=0 \\ 0 & , \quad i \neq 0 \end{cases}$$

이다.

반사격자 관점에서 구한 수식을 누설파 안테나 관점에서의 수식으로 변환하기 위해서는 입사자계를 제거 ($E_o=0$)하고, y방향의 전파상수 β_o 를 복소 전파상수 $(\beta - ja)$ 로 대체하면 된다.

3. 수치해석 결과

접지된 유전체층 위에 스트립이 주기적으로 놓여 있는 구조에서 TE 편파된 평면파에 대하여 각 영역에서의 전자계를 공간 조화함수의 선형적인 합으로 표현한 후에 전자계의 연속조건과 경계조건을 부과하여 선형 행렬 방정식을 유도하였다. 수치해석 방법을 이용하여 선형 행렬 방정식으로부터 주기구조의 여러 가지 파라미터의 변화에 따른 반사격자 관점에서의 산란특성을 조사하였다.

스트립 격자구조에서 여러 가지 파라미터중 먼저 유전체층의 두께 변화에 따른 반사파 전력을 수치해석하여 그 결과를 도시하면 그림 2와 같다. 그림 2에서 유전체의 비유전율 ϵ_r 은 1.03이고, 스트립의 폭과 주기의 비 a/d 는 0.5로 일정하고, 스트립의 주기 d 는 1.1831λ 로 일정하다. 그리고 TE 편파된 평면파의 입사각은 Bragg각($\sin^{-1}\lambda/2d$)인 $\theta_i = 25^\circ$ 로 일정하게 두었다. 그림 2에서 보는 바와 같이 유전체층의 두께의 변화에 따라 Bragg blazing 점이 4군데에서 발생됨을 알 수 있으며, 이 점들을 각각 A, B, C와 D라고 하였다.

그림 3에는 유전체층의 두께변화에 따른 모드별 계수 크기를 나타내었다. 그림 3에서 알 수 있듯이 그림 2의 Bragg blazing이 일어나는 4군데 A, B, C, 및 D 점에서는 모드간의 계수의 크기가 짝, 즉 $A_0 = |A_{-1}|$, $A_1 = |A_{-2}|$, $A_2 = |A_{-3}| \dots$ 을 이루고 있음을 확인하였다.

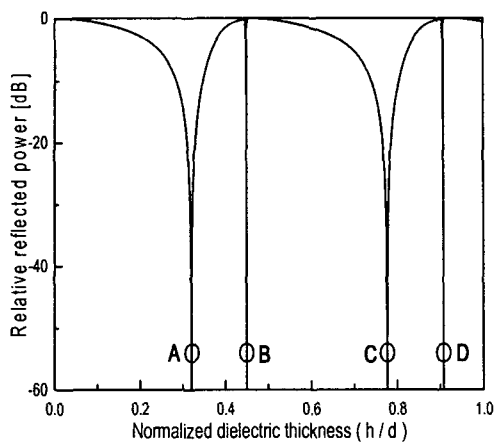


그림 2. 유전체층의 두께에 따른 반사파 전력

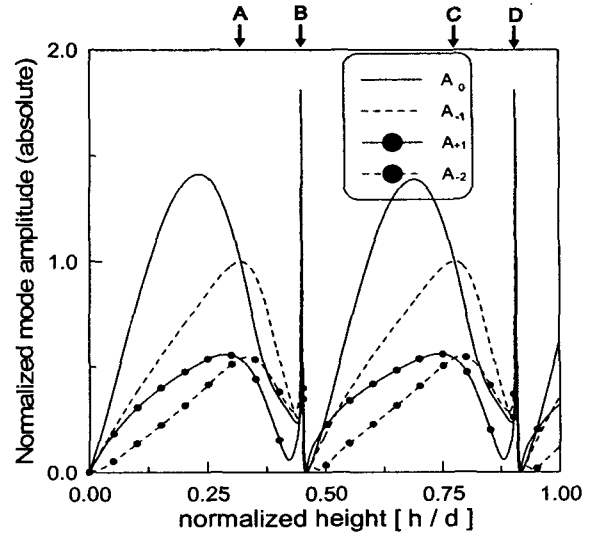


그림 3. 유전체층의 두께에 따른 모드별 계수

스트립 격자구조에서 입사각에 따른 Bragg blazing 특성을 얻기 위해 그림 2에서의 Bragg blazing이 일어나는 4개의 점 A, B, C와 D점에 대해 각각 입사각도의 변화에 따른 반사파 전력을 도시하면 그림 4에 같다. 그림에서와 같이 A점과 C점(비공진형) 및 B점과 D점(공진형)의 산란특성이 유사함을 알 수 있었다.

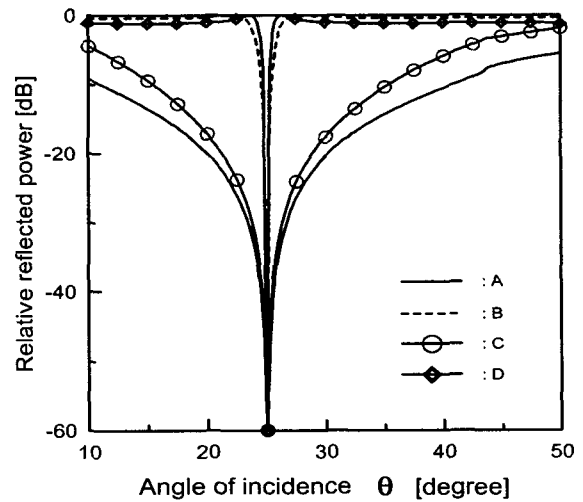
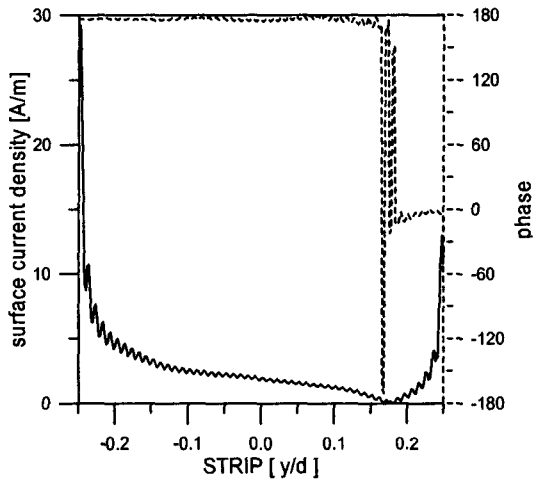


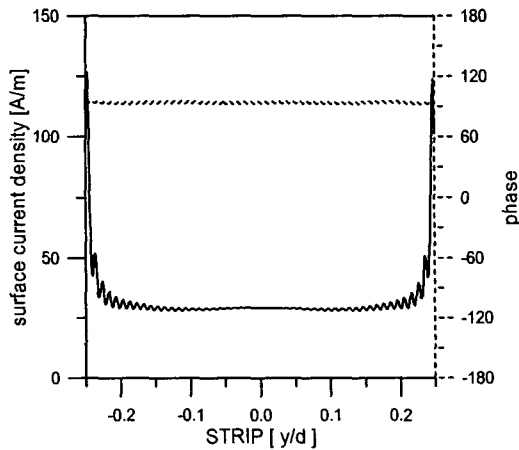
그림 4. 입사각의 변화에 따른 반사파 전력

스트립상에 유기되는 전류밀도의 크기와 위상의 변화를 구하여 그 특성을 확인한 결과, A점과 C점 및 B점과 D점이 서로 유사함을 확인하였다. 그리고 그림 5에는 A점과 B점에 대한 전류분포만을 제시하였다. 그

림에서와 같이 B점 전류밀도의 크기가 A점 전류밀도의 크기에 비하여 매우 크며, 또한 전류밀도의 위상이 일정한 특성모드의 전류분포임을 알 수 있다. 그리고 B와 D점의 격자구조에 대하여 누설파 안테나 관점에서 복소 전파상수를 구하면 감쇠정수 α 는 최소치가 되고, 위상정수는 Bragg 조건과 동일한 $\beta d = \pi$ 가 되나, A점과 C점의 경우에는 복소 전파상수와 관련이 없음을 확인할 수 있었다.



(a) A점



(b) B점

그림 5. 스트립상의 유기전류밀도

4. 결론

접지된 유전체층 위에 주기적으로 스트립 격자가

놓여 있는 주기구조에서 TE편파된 평면파가 입사되는 경우에 대하여 격자구조의 내부와 외부의 경계면에서 경계조건을 부과하고, 스트립 표면의 유기전류를 미지수로 하는 행렬 방정식을 유도하였다. 이 유도된 행렬 방정식으로부터 수치해석 방법을 이용하여 격자구조의 구조 파라미터에 따른 산란특성의 변화를 관찰하기 위해 반사파 전력과 모드 계수 및 스트립 표면에서 유기되는 전류의 크기와 위상 등을 구하였다. 그 결과, Bragg blazing 현상에 대하여 공진형과 비공진형으로 구분하여 공간조화 모드별 계수의 크기와 반사파 전력 및 스트립에 유기되는 전류의 변화를 설명하였다. 본 연구의 결과에서 격자구조의 여러 가지 파라미터, 유전체층의 높이와 두께, 스트립의 폭과 주기 등을 적절히 변화하면 주파수 분할 다중화기 (frequency division multiplexer)나 주파수 스캐너 (frequency scanner) 및 DBR(distributed Bragg reflection) 발진기 등의 설계에 활용이 가능하다.

참고 문헌

- [1] W. Chen, D. G. Michelson and E. V. Jull, "Off-Bragg TM Blazing of rectangular groove gratings," International Symposium on Electromagnetic Theory, St., Petersburg, Russia, pp. 311-313, 1995
- [2] A. Hessel and A. A. Oliner, "A new theory of Wood's anomalies on optical gratings," Applied optics, vol. 4, no. 10, pp. 1275-1297, 1965.
- [3] J. Jacobson, "Analytical, numerical, and experimental investigation of guided waves on a periodically strip-loaded dielectric slab," IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. AP-18, pp. 379-388, 1970.
- [4] J. A. Encinar, "Mode-matching and point-matching techniques applied to the analysis of metal-strip-loaded dielectric antennas," IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. AP-38, pp. 1405-1412, Sept. 1990.
- [5] K. A. Jose and K. G. Nair, "Reflector-Backed perfectly blazed strip gratings simulated corrugated reflector effects," Electron. Lett., vol. 23, no. 2, pp. 86-87, Jan. 1987.
- [6] H. A. Kalhor, "Electromagnetic scattering by a

dielectric slab loaded with a periodic array of strips over a ground plane," IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. AP-36, no. 1, pp. 147-151, Jan. 1988.

- [7] 조용희, 조영기, "접지된 유전체 슬랩 위의 스트립 격자구조에서 입사파의 편파에 무관한 Bragg blazing 현상과 Bragg 및 off-Bragg blazing 현상", 한국전자과학회 논문지, vol. 12, no. 2, pp.193-198, 2001.
- [8] 조용희, 홍재표, 김종규, 조영기, "접지된 유전체 슬랩 위에 위치한 격자구조에서의 전자기적 산란 공진: TM편파 경우의 Bragg blazing 현상", 한국전자과학회 논문지, vol. 11, no. 8, pp.1363-1374, 2000.
- [9] Y. K. Cho, J. W. Ra, U. H. Cho, and J. I. Lee, "Off-Bragg TE blazing of a periodic strip grating on a grounded dielectric." Electron. Lett., vol. 33, no. 17, pp. 1446-1447, Aug. 1997.



홍 재 표 (Jae Pyo Hong)

1981년 경북대학교 전자공학과

1983년 경북대학교 대학원
전자공학과(공학석사)

1989년 경북대학교 대학원
전자공학과(공학박사)

1990년 3월 - 현재: 경 일 대 학 교
전자정보공학과 교수

관심분야 : 마이크로파소자, 안테나, 전파전파



조 응 희 (Ung Hee Cho)

1987년 경북대학교 전자공학과

1989년 경북대학교 대학원
전자공학과 (공학석사)

2000년 경북대학교 대학원
전자공학과 (공학박사)

1989년~1995년: 국방과학연구소 연구원

1999년-현재 경동정보대학 컴퓨터정보통신계열 교수

관심분야 : 안테나 이론, 전자파산란, 전자장 수치해석,
EMI/EMC