

손실 유전체를 이용한 공동 내부의 전자계 저감 특성

Reduction Characteristics of Electromagnetic Fields in Cavity by Lossy Dielectric Materials

정 광 현 · 김 기 채

Gwang-Hyun Jung · Ki-Chai Kim

요 약

본 논문에서는 내부 전자파원에 의해 여기된 공동의 내벽 한 면에 손실 유전체를 설치한 경우 공동 내부로 공급된 전력과 반사계수를 계산하였으며, 손실 유전체에 의해 공동 내부의 전자계가 저감되는 특성을 검토하고 있다. 이론 해석으로는 내부 전자파원의 전류 분포 및 손실 유전체 경계면에서의 전계분포에 관한 연립 적분방정식을 유도하고 Galerkin의 모멘트법으로 해석하여 공동에 공급된 전력과 반사계수를 구하고 있다. 이론해석 결과, carbon을 함유한 발포 폴리스티렌을 손실 유전체로 사용하여 유전체의 두께와 carbon 함유량을 조절함으로써 공동 내부 전자파원으로부터의 전자파 방사를 저감시킬 수 있음을 보이고 있으며, 공급 전력의 실험치와도 비교하여 이론 해석의 타당성을 확인하고 있다.

Abstract

This paper presents the delivered power and reflection coefficient in metallic shielding enclosure excited by the interior source, which are evaluated with the method of moments, and describes a method for reducing the radiation of electromagnetic fields in the cavity by putting lossy dielectric material in one inside wall. In this paper we introduce carbon polystyrene-foam as lossy dielectric material and observe it's effects of reduction when the thickness and permittivity of lossy dielectric material are changed. The results show that the reduction of the electromagnetic radiation can be achieved by controlling the amount of carbon in lossy dielectric material. The theoretical analysis is verified by the measured delivered power.

Key words : EMI, Reduction, Dielectric Material, Shielding Enclosure, Electromagnetic

I. 서 론

최근 급증하고 있는 전기, 전자, 정보처리기기들은 디지털화, 소형화, 저전력화 되어가고 있다. 이러한 전기, 전자, 정보처리기기들의 사용이 증가함에 따라 최근 각 국에서는 기기들의 복사성 장애 전자파의 규제가 강화되고 있다. 기기 내부에는 PCB(Printed Circuit Board)가 있으며 PCB의 배선으로부터 방사되는 전자파가 잡음원으로 작용하여 다른 기기에 오작동을 유발하는 등 많은 문제를 야기시킬

수 있다. 따라서 기기 내부에서 발생하는 전자계의 크기를 예측하고 이를 감소시키는 연구가 절실히 요구된다.

공동으로부터 방사되는 전자파의 저감에 관한 연구는 개구를 가진 공동으로부터 방사되는 전자파의 저감에 관한 연구^{[1]~[4]}와 공동의 내벽에 합성 자성체를 설치하여 공동의 Q를 감소시키는 연구^[5] 등 여러 연구자들에 의해 보고되고 있다.

본 논문에서는 공동의 내부를 여기시키기 위해 공동 내부에 급전 포스트를 배치하고 공동의 내벽

영남대학교 전자정보공학부(School of Electrical Engineering and Computer Science, Yeungnam University)

· 논문 번호 : 20030524-09S

· 수정완료일자 : 2003년 7월 30일

한 면에 carbon을 함유시킨 발포 폴리스티렌을 설치, carbon의 함유량을 적절히 조절하면 급전 포스트로부터 공동의 내부에 방사되는 전자파를 저감시킬 수 있음을 보이고 있다. 이론 해석으로는 공동 내부의 급전 포스트에 흐르는 전류 분포 및 손실 유전체 경계면에서의 전계 분포에 관한 연립 적분방정식을 유도하고, 그 해를 Galerkin의 모멘트법으로 구하여 공동 내부의 전자계 저감 특성을 검토하였다. 공동 내부로 전달되는 공급 전력의 실험치와도 비교하여 이론 해석의 타당성도 확인하였다.

II. 이론해석

2-1 공동의 구조와 좌표계

그림 1은 공동의 내부에 전자파원이 있고 내벽의 한 면에 손실 유전체(ϵ_r)가 설치된 공동의 구조와 좌표계를 나타낸다. 공동의 단면적은 $a \times b$ 이며 손실 유전체의 두께는 u 이다. 공동의 내부 전자파원으로 가장한 급전 포스트는 반경이 r 이며 $x=d$, $z=s$ 의 위치에 배치되어 있다. 또한 PCB에서 발생하는 손실을 나타내기 위해 포스트의 한쪽 끝단에 저항 R 을 부착하였다. 포스트와 공동은 모두 완전도체로 가정하였다.

2-2 적분방정식

공동 내부의 포스트는 $y=0$ 인 위치에서 전압 V 인 델타함수적 전원으로 급전한다고 가정하면 급전포스트에 흐르는 전류분포 \vec{J} 에 관한 연립 적분방정식은 다음과 같다. 본 논문에서는 x 와 같은 표기를 x 방향의 단위벡터, \vec{A} 와 같은 표기를 벡터로, 그리고 \vec{A} 와 같은 표기를 다이애딕으로 나타내기로 한다.

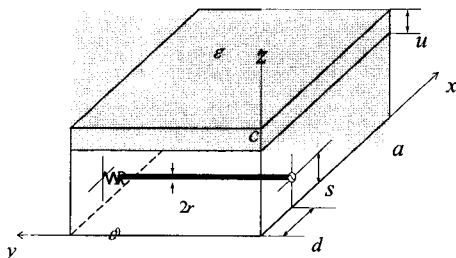


그림 1. 손실 유전체가 설치된 공동의 구조와 좌표계
Fig. 1. Geometry of the metallic shielding enclosure with lossy dielectric material.

손실 유전체를 이용한 공동 내부의 전자계 저감 특성

$$\begin{aligned} & \frac{1}{j\omega \epsilon_0} \oint_{S'} \vec{K}^{I}_{ee}(\vec{r}, \vec{r}') \cdot \vec{J}(\vec{r}') dS' \\ & - \frac{1}{j\omega \epsilon_0} \int_{S_a} \vec{K}^{I}_{em}(\vec{r}, \vec{r}') \cdot (\vec{z} \times \vec{E}_a) dS'_a \\ & = -V_y \delta(y) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \left[\oint_{S_a} \vec{K}^{I}_{he}(\vec{r}, \vec{r}') \cdot \vec{J}(\vec{r}') dS' \right. \\ & + \frac{1}{j\omega \mu_0} \int_{S_a} \vec{K}^{I}_{hm}(\vec{r}, \vec{r}') \cdot (\vec{z} \times \vec{E}_a) dS'_a \\ & \left. = \frac{1}{j\omega \mu_0} \int_{S_a} \vec{K}^{II}_{hm}(\vec{r}, \vec{r}') \cdot (\vec{E}_a \times \vec{z}) dS'_a \right]_{t.c.} \end{aligned} \quad (2)$$

$t.c. : \text{tangential components}$

여기서, ϵ_0 및 μ_0 는 각각 진공의 유전율 및 투자율이며, y 는 y 방향의 단위벡터, $\delta(x)$ 는 Dirac의 델타함수이다. \vec{r} , \vec{r}' 은 관측점 및 파원점의 위치 벡터이며 시간 의존성은 $\exp(j\omega t)$ 이다. S 와 S_a 는 각각 급전 포스트의 표면 및 $z=c-u$ 의 경계면을 나타낸다. 또한 급전 포스트의 반경이 사용과장에 비교하여 충분히 작다고 가정하면 전류는 포스트의 중심축에 집중하여 흐른다고 가정할 수 있다. 연립 적분방정식 (1), (2)에서 적분해는 다음 식으로 주어진다.

$$\vec{K}^{I}_{ee}(\vec{r}, \vec{r}') = (\vec{I} k_0^2 + \nabla \nabla) \cdot \vec{G}^I_e(\vec{r}, \vec{r}') \quad (3)$$

$$\vec{K}^{I}_{em}(\vec{r}, \vec{r}') = \nabla \times \vec{G}^I_m(\vec{r}, \vec{r}') \quad (4)$$

$$\vec{K}^{I}_{he}(\vec{r}, \vec{r}') = \nabla \times \vec{G}^I_e(\vec{r}, \vec{r}') \quad (5)$$

$$\vec{K}^{I}_{hm}(\vec{r}, \vec{r}') = (\vec{I} k_0^2 + \nabla \nabla) \cdot \vec{G}^I_m(\vec{r}, \vec{r}') \quad (6)$$

$$\vec{K}^{II}_{hm}(\vec{r}, \vec{r}') = (\vec{I} k_0^2 \epsilon_r + \nabla \nabla) \cdot \vec{G}^{II}_m(\vec{r}, \vec{r}') \quad (7)$$

여기서, \vec{I} 는 단위 다이애딕이며, k_0 는 자유공간의 파수이다. 식 (3)~(7)에서 전류원 및 자류원이 전계와 자계를 생성시키는 다이애딕 그린함수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \vec{G}^I_e = & -y_y \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2 \epsilon_{0m}}{ab \Gamma_{nm}^I} \sin \frac{n\pi x}{a} \cos \frac{m\pi y}{b} \\ & \cdot \sin \frac{n\pi x'}{a} \cos \frac{m\pi y'}{b} L^I_{nm}(z, z') \end{aligned} \quad (8)$$

$$L^I_{nm} = \begin{cases} \frac{\sinh \Gamma_{nm}^I z'}{\sinh \Gamma_{nm}^I c} \sinh \Gamma_{nm}^I (z-c), & z \geq z' \\ \frac{\sinh \Gamma_{nm}^I (z'-c)}{\sinh \Gamma_{nm}^I c} \sinh \Gamma_{nm}^I z, & z \leq z' \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \vec{G}^I_m = & - \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2 \epsilon_{0n} \epsilon_{0m}}{ab \Gamma_{nm}^I} \\ & \cdot (x_x N_x + y_y N_y) M^I_{nm}(z, z') \end{aligned} \quad (10)$$

$$M_{nm}^I = \begin{cases} \frac{\cosh \Gamma_{nm}^I z'}{\sinh 2\Gamma_{nm}^I c} \cosh \Gamma_{nm}^I (z-2c), & z \geq z' \\ \frac{\cosh \Gamma_{nm}^I (z'-2c)}{\sinh 2\Gamma_{nm}^I c} \cosh \Gamma_{nm}^I z, & z \leq z' \end{cases} \quad (11)$$

$$\overline{\overline{G}}_m = - \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2 \varepsilon_{0n} \varepsilon_{0m}}{ab \Gamma_{nm}^I} \cdot (x x N_x + y y N_y) M_{nm}^I(z, z') \quad (12)$$

$$M_{nm}^{II} = \begin{cases} \frac{\cosh \Gamma_{nm}^{II} (z' - z_1)}{\sinh 2\Gamma_{nm}^{II} u} \cosh \Gamma_{nm}^{II} (z - z_2) & , z \geq z' \\ \frac{\cosh \Gamma_{nm}^{II} (z' - z_2)}{\sinh 2\Gamma_{nm}^{II} u} \cosh \Gamma_{nm}^{II} (z - z_1) & , z \leq z' \end{cases} \quad (13)$$

$$\Gamma_{nm}^I = \sqrt{\left(\frac{n\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{m\pi}{b}\right)^2 - k_0^2} \quad (14)$$

$$\Gamma_{nm}^{II} = \sqrt{\left(\frac{n\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{m\pi}{b}\right)^2 - k_0^2 \varepsilon_r} \quad (15)$$

$$N_x = \sin \frac{n\pi x}{a} \cos \frac{m\pi y}{b} \sin \frac{n\pi x'}{a} \cos \frac{m\pi y'}{b} \quad (16)$$

$$N_y = \cos \frac{n\pi x}{a} \sin \frac{m\pi y}{b} \cos \frac{n\pi x'}{a} \sin \frac{m\pi y'}{b} \quad (17)$$

미지의 전류분포 \overline{J} 와 경계면 전계 분포 \overline{E}_a 에 관한 연립 적분방정식 (1), (2)는 모멘트법^[7]을 사용하여 해석한다. 먼저, 전류분포 및 경계면 전계분포를 다음과 같은 기지의 함수로 전개한다.

$$\overline{J}(y') = y \sum_{l=0}^L I_l \cos \frac{l\pi y'}{b} \quad (18)$$

$$\overline{E}_a(x', y') = x \sum_{\beta=0}^P \sum_{q=1}^Q E_{x\beta q} \cos \frac{\beta\pi x'}{a} \sin \frac{q\pi y'}{b} + y \sum_{\beta=1}^P \sum_{q=0}^Q E_{y\beta q} \sin \frac{\beta\pi x'}{a} \cos \frac{q\pi y'}{b} \quad (19)$$

여기서, I_l 및 $E_{x\beta q}$, $E_{y\beta q}$ 는 미지의 전개계수이다.

식 (18), (19)를 연립 적분방정식 (1), (2)에 대입하고 Galerkin의 방법을 적용하면 연립 적분방정식은 연립 일차방정식으로 변환되며 이로부터 급전포스트상의 전류분포와 반사계수 그리고 공동에 공급된 전력을 구할 수 있다.

III. 수치해석 결과 및 검토

도전성 물질로 이루어진 공동은 고유 공진 주파수를 가진다. 공동 내부에 존재하는 전자파원으로부터 방사되는 전자파에 의해 공동 내부에 전자계가

유기될 때 EMI 측면에서 가장 심각한 전자계는 공동의 고유 공진 주파수에서의 전자계이다^[5]. 공동의 고유 공진 주파수를 알아보기 위해 먼저 유전체가 설치되지 않은 공동의 공진 특성을 검토하였다.

수치계산에 사용한 공동의 제원은 다음과 같으며 공동의 치수는 실험치와 비교하기 위해 참고논문 [3]의 치수를 사용하였다.

- 1) 내부 전자파원의 주파수: $f = 0.7 \sim 1.6$ GHz
- 2) 공동의 치수: $a=0.3$ m, $b=0.14$ m, $c=0.22$ m
 $d=0.15$ m, $s=0.17$ m, $R=47 \Omega$

그림 2는 공동 내부에 손실 유전체를 설치하지 않았을 경우 공동으로 공급된 전력과 반사계수를 나타낸 것이다. 검토의 대상으로 선택한 주파수는 공동의 기본 모드를 포함한 0.7 GHz에서 1.6 GHz까지이다. 공동 내부로 공급된 전력은 반사계수와 다음과 같은 관계가 있다^[8].

$$P = \frac{V^2}{8 Z_0} (1 - |S_{11}|^2) \quad (20)$$

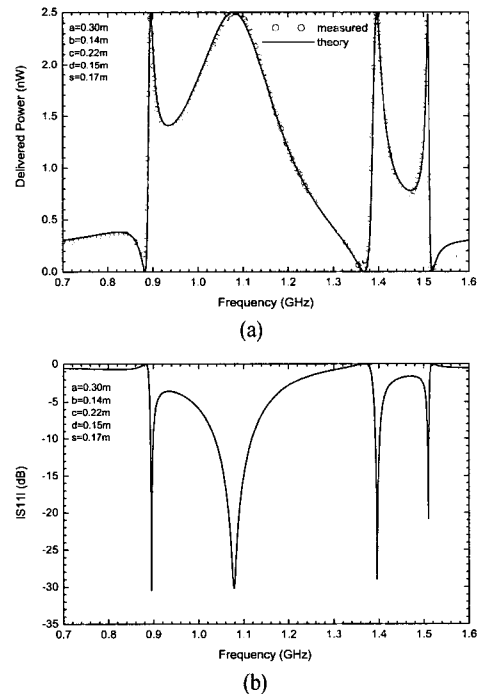


그림 2. 손실 유전체를 설치하지 않은 공동의 (a) 공급된 전력, (b) 반사계수

Fig. 2. Frequency characteristics of (a) delivered Power, (b) reflection coefficient.

여기서, V_s 는 전원의 전압, Z_0 는 전원의 임피던스이다. $V_s=1$ mV, $Z_0=50 \Omega$ 인 경우 공급된 전력은 2.5 nW이다. 공동의 공진은 공동으로 공급된 전력으로부터 결정되며 공급된 전력과 반사계수 $|S_{11}|$ 으로부터 공동 내부로 방사된 EMI를 예측할 수 있다.

그림 2로부터 0.89 GHz, 1.40 GHz, 1.51 GHz 에서 각각 TE101, TE111, TE210 공동모드에 대한 공진이 나타남을 알 수 있으며, 공동 내부로 공급된 전력의 계산 결과는 실험 결과^[3]와도 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다. 또한 각각의 공진 주파수에서는 전원에 의해 공급된 전력의 대부분이 공동 내부로 방사된다는 것을 알 수 있다.

본 논문에서는 공동 내부로 방사되는 전자계를 저감시키기 위해 공동의 한 면에 손실 유전체를 설치하였다. 이 방법은 타 연구자들에 의해서도 연구가 활발히 진행되고 있으나^{[3],[5]}, 자세한 검토는 이루어져 있지 않다. 본 논문에서는 공동내벽의 한 면에 설치한 손실 유전체의 두께와 유전율 값을 변화시켰을 때, 공동의 내부로 방사되는 전자파의 크기를 검토하였다. 설치하는 손실 유전체로는 carbon을 함유한 발포 폴리스티렌을 선택하였다. 이러한 손실 유전체의 유전율 ϵ 는 carbon 함유량 G g/l과 주파수 f GHz의 함수이며 다음 식으로 결정된다^[8].

$$\begin{aligned} \epsilon &= (\epsilon_r - j\epsilon'') \epsilon_0 \\ \epsilon_r &= (1 + 0.039 Gf^{-0.4})^2 - (0.03 Gf^{-0.4})^2 \\ \epsilon'' &= 0.06 Gf^{-0.4} (1 + 0.039 Gf^{-0.4}) \end{aligned} \quad (21)$$

그림 1의 공동 구조에서 $z=c$ 의 위치에 두께 u 의 carbon 발포 폴리스티렌을 설치하였을 때, Carbon 발포 폴리스티렌의 carbon 함유량을 10~50 g/l로 변화시키며 주파수 변화에 따른 공동으로 공급된 전력과 반사계수 $|S_{11}|$ 을 검토하기로 한다.

그림 3은 TE101 모드의 공진 주파수인 0.89 GHz에서 손실 유전체의 carbon 함유량을 변화시켰을 때 $|S_{11}|$ 의 주파수 특성을 나타낸 것이다. 그림 3으로부터 carbon 함유량과 유전체의 두께가 증가할수록 반사계수 $|S_{11}|$ 이 크게 되어 전자파의 방사가 억압됨을 알 수 있다.

그림 4는 두께가 3 cm인 carbon 발포 폴리스티렌

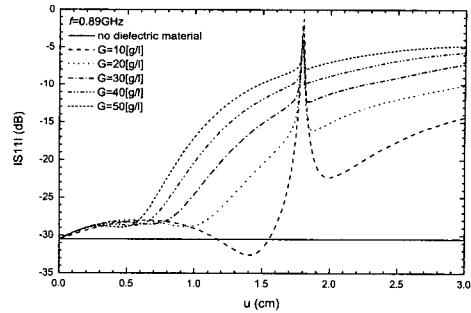
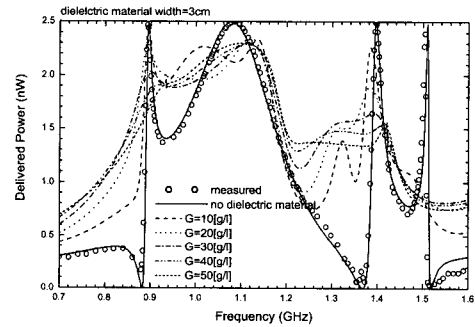
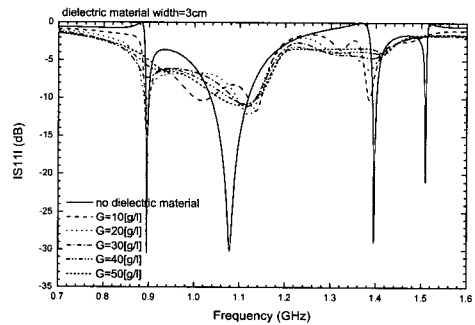


그림 3. 손실 유전체의 두께와 반사계수 $|S_{11}|$ 와의 관계($G=10 \sim 50$ g/l)

Fig. 3. $|S_{11}|$ vs. dielectric material's thickness($G=10 \sim 50$ g/l).



(a)



(b)

그림 4. carbon 함유량 변화에 의한 (a) 공급된 전력과 (b) 반사계수 $|S_{11}|$ 의 주파수 특성

Fig. 4. Frequency characteristics of (a) delivered power and (b) $|S_{11}|$ (with dielectric material).

을 설치하고 carbon 함유량 G 를 변화시켰을 때의 공동으로 공급된 전력과 $|S_{11}|$ 의 주파수 특성을 나타낸 것이다. 각각의 공진모드에서 carbon 함유량 G 가 증가할수록 공동으로 공급된 전력이 감소하고 $|S_{11}|$ 는 커지게 되는 것을 확인할 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 내부 전자파원에 의해 공동 내부로 전자파가 방사될 때 공동으로 공급된 전력과 반사계수 $|S_{11}|$ 을 모멘트법을 사용하여 계산하였다. 공동 내부로 방사되는 전자파를 저감시키기 위해 공동 내벽의 한 면에 손실 유전체, 즉 carbon 발포 폴리스티렌의 설치를 제안하였으며, carbon 함유량 및 두께를 조절하면 공동 내부로 방사되는 전자파를 저감할 수 있음을 확인하였다. 이론해석 결과, 손실 유전체의 두께가 두꺼울수록, 또한 손실 유전체가 다량의 carbon을 함유할수록 공동 내부로 방사되는 전자파가 효율적으로 저감됨을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] M. Li, J. Nuebel, J. L. Drewniak, R. E. DuBroff, T. H. Hubing and T. P. Van Doren, "EMI from cavity modes of shielding enclosure-FDTD modeling and measurements", *IEEE Trans., Electromagnetic Compatibility*, vol. 42, no. 1, Feb. 2000.

[2] W. Wallyn, F. Olyslager, E. Laermans, D. De Zutter, R. De Smedt and N. Lietaert, "Fast Evaluation of Shielding Efficiency of Rectangular Shielding Enclosures", *1999 IEEE International*

Symposium on, vol. 1, pp. 311-316, 1999.

[3] M. Li, K-P. Ma, J. L. Drewniak, T. H. Hubing and T. P. Van Doren, "Numerical and Experimental Corroboration of an FDTD Thin-Slot Model for Slots Near Corners of Shielding Enclosures", *IEEE Trans., Electromagnetic Compatibility*, vol. 39, pp. 225-232, Aug. 1997.

[4] F. Olyslager, E. Laermans, D. De Zutter, S. Criel, R. De Smedt, N. Lietaert and A. De Clercq, "Numerical and Experimental study of the Shielding Effectiveness of a metallic enclosure", *Electromagnetic Compatibility, IEEE Trans.*, vol. 41, pp. 202-213, Aug. 1999.

[5] Y. Hotta, Xiaohe Li, O. Hashimoto and S. Nitta, "A study on suppression of cabinet resonance by means of the hybrid magnetic materials", *2001 IEEE International Symposium on*, vol. 2, pp. 713-718, 2001.

[6] T. Nakamura, S. Tokumaru and S. Itoh, "Reduction of SAR in Human Body by Lossy Dielectric Shield", *IEICE Trans.*, vol. J79-B-II, no. 11, pp. 941-949, Nov. 1996.

[7] R. F. Harrington, *Field Computation by Moment Methods*, IEEE Press, 1993.

[8] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, Addison Wesley, 1990.

정 광 현



2002년 2월: 영남대학교 전기공학과 (공학사)
 2002년 3월~현재: 영남대학교 대학원 전기공학과 석사과정
 [주 관심분야] EMC/EMI

김 기 채



1984년 2월: 영남대학교 전자공학과 (공학사)
 1986년 3월: Keio Univ. 대학원 (공학석사)
 1989년 3월: Keio Univ. 대학원 (공학박사)
 1989년 4월~1993년 3월: 한국표준과학연구원 전자파연구실 선임연구원
 1993년 4월~1995년 8월: 일본 후쿠오카 공업대학 정보공학과 조교수
 1995년 9월~현재: 영남대학교 전자정보공학부 부교수, 한국전자과학회 학회지 편집위원장
 [주 관심분야] EMC/EMI 관련 안테나 및 측정시설, 소형 안테나, 전자파 이론 및 응용