

# FSS 레이돔 내부 안테나의 전자파 복사 특성 계산 방법

김 지 형 · 박 용 배

아주대학교 전자공학과

## I. 서 론

레이돔은 레이더(radar)와 돔(dome)의 두 단어를 합성한 말이다. 레이더는 고주파 지향성 전파를 공간에 발사·포착하여 항공기나 장애물 또는 기타의 목적물을 탐지하는 장치인데, 이 안테나를 강한 풍압 혹은 강우, 강설 등의 외부 환경으로부터 보호하기 위해 설치하는 것이 레이돔이다. 레이돔의 전파 특성을 해석하기 위해서 주로 수치 해석법이 많이 이용되는데, 레이돔은 크기가 파장에 비해 크며, 해석해야 할 영역이 넓기 때문에 수치 해석법을 이용한 full wave 해석 방법은 많은 계산을 필요로 한다. 이에 비해 광선 추적법과 물리 광학법을 이용한 근사적인 해석 방법을 이용하면, full wave 해석 방법보다 효율적으로 레이돔 전파 특성을 계산할 수 있다<sup>[1]</sup>. 최근에는 레이더 단면적(Radar Cross Section)이 큰 레이더용 안테나의 스텔스 성능을 높이기 위한 방법의 하나로 주파수 선택 표면(Frequency Selective Surface: FSS)을 이용한 레이돔에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다<sup>[2]-[7]</sup>. FSS 레이돔의 전파 특성을 분석하기 위해서 다층으로 구성된 유전체에서의 다중 반사와 FSS 곡면의 전자기적 특성을 고려해야 한다. 본 논문에서는 FSS 레이돔 내부 안테나의 전자파 복사 특성 계산 방법을 소개하고자 한다. 광선 추적법을 이용하여 다층 유전체에서의 전자파의 반사, 투과 경로를 분석하고, FSS 층에서의 투과 및 반사는 평면 FSS의 입사각, 편파에 따른 반사계수 및 투과계수를 이용하여 계산한다. 물리 광학법을 이용하여 마지막 곡면에서의 전자기장으로부터 레이돔 내부 안테나

의 복사 패턴을 계산한다. 마지막으로, Von Karman FSS 레이돔 및 Tangent-Ogive FSS 레이돔의 전파 해석 결과를 소개한다.

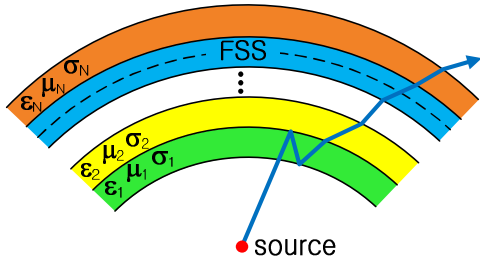
## II. 계산 이론

### 2-1 광선 추적법 및 물리 광학법

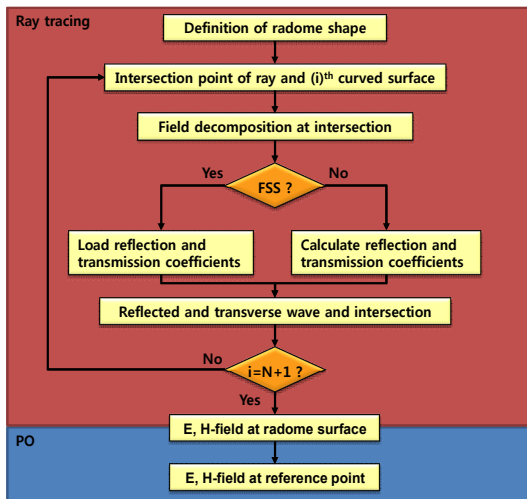
광선 추적법은 산란체의 크기가 파장보다 굉장히 큰 경우에 전자파를 광선으로 가정할 수 있으므로, 파장에 비해 크기가 큰 레이돔의 전파 특성을 효율적으로 계산할 수 있다.

광선 추적법은 광선의 경로 및 광선이 포함하는 전자기장의 세기 및 위상을 계산한다. 전원에서부터 출발한 광선과 레이돔의 교점을 구하고, 입사각 및 편파에 따른 반사 및 투과계수를 이용하여 광선의 경로, 전자기장의 세기를 결정한다. 이를 이용하여, 레이돔 내부에 전원이 있을 때, 원거리 관측점에 도달하는 광선의 경로를 고려하여 복사 전자기장을 구하거나(transmitting mode), 외부 전원에서부터 레이돔 내부로 들어오는 전파를 계산(receiving mode)할 수 있다.

[그림 1]에 N층으로 구성된 FSS 레이돔과 점 전원에서 발생한 광선의 경로를 도시하였다. FSS 레이돔은 다층 유전체 층과 FSS 곡면으로 구성되며, 레이돔 내부에 점 전원이 있다. N층으로 구성된 레이돔의 형상과 유전율, 형상 등을 정의한다. FSS 레이돔 해석 알고리즘의 순서도를 [그림 2]에 도시하였다. 레이돔 해석 알고리즘은 광선 추적법과 물리 광학법으로 구성된다. 레이돔의 내부는 광선 추적법을 이용



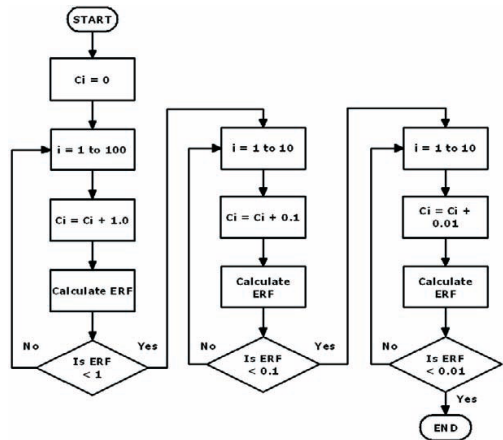
[그림 1] FSS 레이돔과 광선의 진행 경로 예시



[그림 2] FSS 레이돔 해석 알고리즘 순서도<sup>[6]</sup>

하며, 레이돔 표면에서 물리 광학법을 이용하여 복사 전자기장을 계산한다. FSS 층은 추출된 편파/입사각에 대한 반사 및 투과 계수를 대입하여 해석한다.

광선의 경로를 계산하기 위해 점 전원에서 발생하는 광선과 각 레이돔 표면에서의 교점을 구한다. [그림 3]에 Brute root finder 알고리즘의 순서도를 도시하였다. Brute root finder 알고리즘은 여러 단의 반복분으로 구성된다. 각 단계에서 초기 값( $C_i$ )에 급수를 더하면서 기준 조건(ERF)을 만족하면 더 작은 급수를 더하여 해에 근접해 간다. 광선의 경로를 계산하기 위해 3차원으로 알고리즘을 확장하였으며, 각 단계에서 더해지는 급수의 단위벡터는 광선의 진행

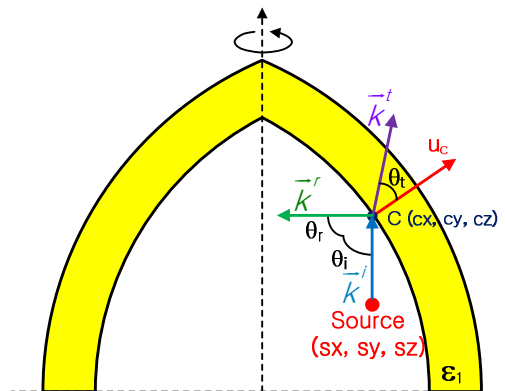


[그림 3] Brute root finder 알고리즘 순서도<sup>[1]</sup>

방향으로 설정하였다. 본 방법은 임의 구조의 레이돔에 적용할 수 있으며, tangent-ogive, Von Karman 레이돔과 같은 복잡한 구조의 레이돔과 광선의 교점을 구하는데 적합하다.

광선과 레이돔 표면에서의 교점에서 법선 벡터( $u_n$ )를 정의하고 스넬의 법칙을 이용하여 반사파( $k_r$ )의 방향, 경계에서 유전율을 이용하여 투과파( $k_t$ )의 방향을 결정한다(그림 4).

레이돔과 광선의 교점에서 parallel, perpendicular 입사에 따른 반사 및 투과계수가 각각 정의되므로, 입



[그림 4] 교점과 반사파 및 투과파 방향 벡터<sup>[1]</sup>

사파의 진행방향과 접평면의 법선 벡터를 이용하여 [그림 5]와 같이 입사파의 편파 분리가 필요하다. 입사파의 perpendicular, parallel 성분의 단위 벡터가 각각 식 (1) 및 (2)와 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \vec{D} &= \vec{n} \times \vec{k}^i \\ &= \frac{(n_y k_z - n_z k_y)\hat{x} + (n_z k_x - n_x k_z)\hat{y} + (n_x k_y - n_y k_x)\hat{z}}{\sqrt{(n_y k_z - n_z k_y)^2 + (n_z k_x - n_x k_z)^2 + (n_x k_y - n_y k_x)^2}} \end{aligned} \quad (1)$$

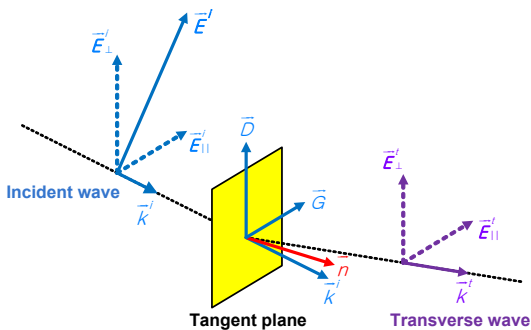
$$\begin{aligned} \vec{G} &= \vec{D} \times \vec{k}^i \\ &= \frac{(D_y k_z - D_z k_y)\hat{x} + (D_z k_x - D_x k_z)\hat{y} + (D_x k_y - D_y k_x)\hat{z}}{\sqrt{(D_y k_z - D_z k_y)^2 + (D_z k_x - D_x k_z)^2 + (D_x k_y - D_y k_x)^2}} \end{aligned} \quad (2)$$

위의 단위 벡터를 이용하여 입사파를 식 (3), (4)와 같이 perpendicular, parallel 성분으로 나눌 수 있다.

$$\vec{E}_{\perp}^i = \vec{E}^i \cdot \vec{D} = E_x^i D_x \hat{x} + E_y^i D_y \hat{y} + E_z^i D_z \hat{z} \quad (3)$$

$$\vec{E}_{\parallel}^i = \vec{E}^i \cdot \vec{G} = E_x^i G_x \hat{x} + E_y^i G_y \hat{y} + E_z^i G_z \hat{z} \quad (4)$$

분리된 편파를 이용하여 각 편파의 반사파, 투과파를 계산한다. 경계에서의 유전율 및 투자율을 이용



[그림 5] 입사파 및 투과파의 편파 분리<sup>[1]</sup>

하여 각 편파의 반사 및 투과 계수를 계산한다.

Perpendicular 편파 입사의 경우, 반사 및 투과 계수는 다음과 같다.

$$\Gamma_{\perp} = \frac{\eta_2 \cos \theta_i - \eta_1 \cos \theta_t}{\eta_2 \cos \theta_i + \eta_1 \cos \theta_t} \quad (5)$$

$$T_{\perp} = \frac{2\eta_2 \cos \theta_i}{\eta_2 \cos \theta_i + \eta_1 \cos \theta_t} \quad (6)$$

반사 및 투과계수를 이용하면 perpendicular 편파 입사의 반사파 및 투과파를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\vec{E}_{\perp}^r = |\vec{E}_{\perp}^i| \Gamma_{\perp} \cdot \vec{D} \quad (7)$$

$$\vec{E}_{\perp}^t = |\vec{E}_{\perp}^i| T_{\perp} \cdot \vec{D} \quad (8)$$

Parallel 편파 입사의 경우도 perpendicular 편파와 같은 과정을 통해 반사 및 투과 계수는 다음과 같이 주어진다.

$$\Gamma_{\parallel} = \frac{-\eta_1 \cos \theta_i + \eta_2 \cos \theta_t}{\eta_1 \cos \theta_i + \eta_2 \cos \theta_t} \quad (9)$$

$$T_{\parallel} = \frac{2\eta_2 \cos \theta_i}{\eta_1 \cos \theta_i + \eta_2 \cos \theta_t} \quad (10)$$

Parallel 편파 입사의 반사파 및 투과파를 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\vec{E}_{\parallel}^r = |\vec{E}_{\parallel}^i| \Gamma_{\parallel} \cdot \vec{D} \times \vec{k}^r \quad (11)$$

$$\vec{E}_{\parallel}^t = |\vec{E}_{\parallel}^i| T_{\parallel} \cdot \vec{k}^r \times \vec{D} \quad (12)$$

광선이  $N+1$ 번째 표면에 도달할 때까지 위의 과정을 반복한다. [그림 6]에 레이돔 표면 전자기장을 도시하였다. 광선이 레이돔의 외부 표면에 도달하면, 전자기장의 수평 성분( $\vec{E}_b, \vec{H}_b$ )을 계산한다. 물리 광학 방법을 이용하여 이 전기장의 수평성분으로부터 표면 등가 전류를 계산할 수 있고, 이 표면 등가 전류로부터 원거리에서의 복사 전자기장을 계산할 수 있다<sup>[8]</sup>.

### 2-2 FSS 층 계산 방법

광선 추적법으로 FSS 곡면을 해석하기 위해 편파 및 입사각에 대한 반사 및 투과 계수가 요구된다. 광선이 FSS 곡면과 만나는 점 부근에서는 부분적으로 평면이라고 가정할 수 있으므로, 평판 FSS의 투과 및 반사계수를 이용할 수 있다. 10 GHz에서 통과 대역을 가지는 cross-loop slot FSS의 구조<sup>[9]</sup>를 [그림 7]에, 설계 변수를 <표 1>에 나타냈다. 이 구조에 대해 상

<표 1> Cross-loop slot FSS의 설계 변수

$D_x$	0.861 cm	$d_1$	1.2 cm
$D_y$	0.861 cm	$d_2$	1.2 cm
$l$	0.77 cm	$\epsilon_1$	1.3
$h$	0.017 cm	$\epsilon_2$	1.3

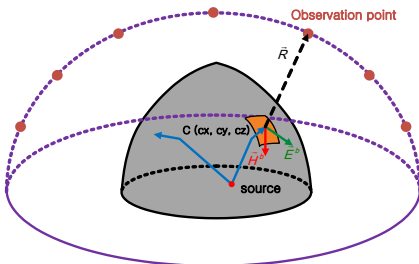
용 시뮬레이션 프로그램인 Microwave studio of CST를 이용하여 편파/입사각에 대한 반사 및 투과 계수를 계산하였다.

[그림 8], [그림 9]에 입사각/편파에 대한 반사 및 투과상수를 각각 도시하였다. 위와 같이 추출된 평판 FSS 층에서의 반사 및 투과상수를 광선 추적법에 대입하여 FSS 층에서의 광선의 경로 및 전자기장을 계산한다.

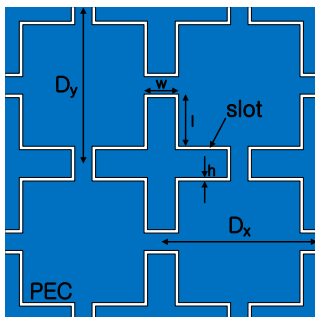
## III. 계산 결과

### 3-1 Von Karman FSS 레이돔 계산 결과<sup>[7]</sup>

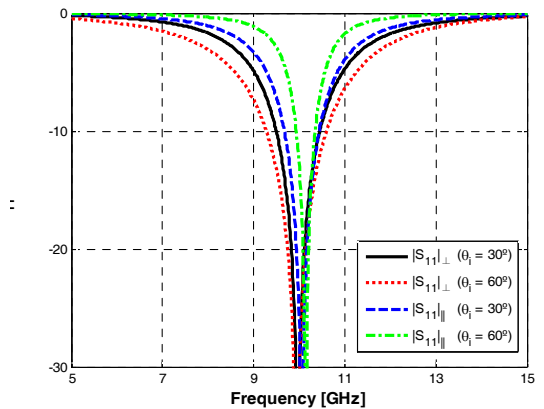
[그림 10]에 Von Karman 레이돔을 도시하였고, <표 2>에 설계변수를 나타냈다. FSS 레이돔은 4개의 층으로 구성되어 있으며, 3개의 점 전원이 내부에 배



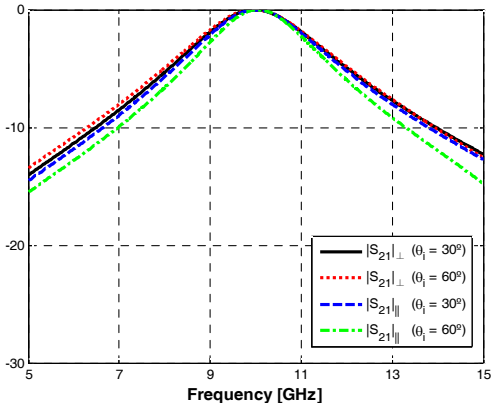
[그림 6] 레이돔의 표면 전자기장



[그림 7] Cross-loop slot FSS<sup>[9]</sup>



[그림 8] 입사각/편파에 대한 반사상수



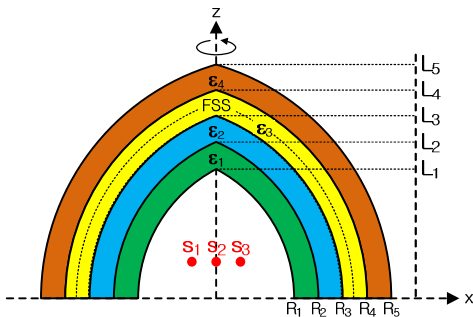
[그림 9] 입사각/편파에 대한 투과상수

치되어 있다. FSS 층은 10 GHz에서 통과 대역을 가지는 cross-loop slot FSS를 적용하였다.

[그림 11]에 Von Karman 구조의 FSS 레이돔이 적용된 배열 안테나의 복사 패턴을 도시하였다. 10 GHz에서 이득이 15 GHz에서의 이득보다 큰 것을 확인할 수 있다. 이는 계산에 사용된 FSS가 10 GHz에서 통과 특성을 갖기 때문이다.

### 3-2 Tangent-Ogive FSS 레이돔 계산 결과<sup>[6]</sup>

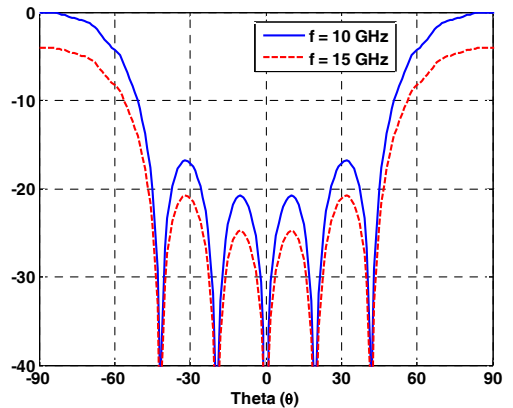
Tangent-Ogive 구조의 FSS 레이돔(그림 12)의 설계 변수는 <표 3>과 같다. FSS 층에 10 GHz에서 통과 대역을 가지는 cross-loop slot 구조를 적용했다. [그림 13]에 FSS 층 유무에 따른 레이돔의 이득을 정규화하여



[그림 10] Von Karman 구조의 FSS 레이돔

<표 2> Von Karman 레이돔의 설계 변수

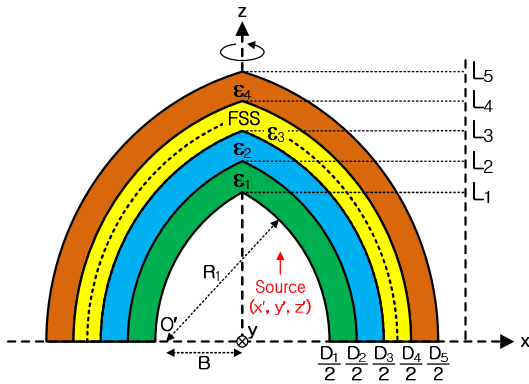
$D_1$	0.184 m	$L_1$	1.494 m
$D_2$	0.188 m	$L_2$	1.496 m
$D_3$	0.192 m	$L_3$	1.497 m
$D_4$	0.196 m	$L_4$	1.499 m
$D_5$	0.2 m	$L_5$	1.5 m
$\epsilon_1$	2	$S_1$	(-0.03, 0, 0.5)
$\epsilon_2$	3	$S_2$	(0, 0, 0.5)
$\epsilon_3$	1.4	$S_3$	(0.03, 0, 0.5)
$\epsilon_4$	3		



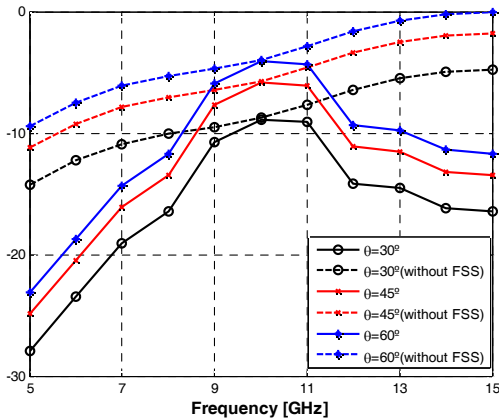
[그림 11] Von Karman 구조의 FSS 레이돔이 적용된 배열 안테나의 복사패턴

<표 3> Tangent-Ogive 레이돔 설계변수

$D_1$	4.5 m	$L_1$	4.97 m	$\epsilon_1$	2
$D_2$	4.58 m	$L_2$	5.06 m	$\epsilon_2$	3
$D_3$	4.66 m	$L_3$	5.14 m	$\epsilon_3$	1.4
$D_4$	4.9 m	$L_4$	5.38 m	$\epsilon_0$	3
$D_5$	4.98 m	$L_5$	5.46 m	Source	(0, 0, 0)



[그림 12] Tangent-Ogive 구조의 FSS 레이돔



[그림 13] 주파수에 대한 정규화 된 레이돔의 이득

도시하였다. 10 GHz 부근에서 FSS 층 유무에 따른 이득 차이가 적고, 그 외의 대역에서 이득 차이가 크게 나오는데, 이는 FSS가 10 GHz에서 통과 특성을 갖기 때문이다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 FSS 레이돔 내부 안테나의 전자파 복사 특성 계산 방법에 대해 살펴보았다. 광선 추적법을 이용하여 다층 유전체에서의 전자파의 반사, 투과 경로를 분석하고, FSS 층에서의 투과 및 반사

는 평면 FSS의 입사각, 편파에 따른 반사계수 및 투과계수를 이용하여 계산하였다. 물리 광학법을 이용하여 마지막 곡면에서의 전자기장으로부터 레이돔 내부 안테나의 복사 패턴을 계산하였다. 그리고 Von Karman FSS 레이돔 및 Tangent-Ogive FSS 레이돔의 전파 해석 결과를 제시하였다. 본 논문에서 소개한 계산 방법은 FSS 레이돔의 복사 특성 및 레이더 단면적 계산 등에 폭넓게 사용될 수 있다.

#### 참 고 문 헌

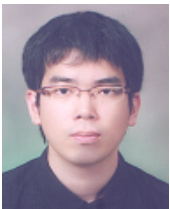
- [1] D. J. Kozakoff, *Analysis of Radome-Enclosed Antennas*, Artech House, 1997.
- [2] B. Philips, E. A. Parker, and R. J. Langley, "Ray tracing analysis of the transmission performance of curved FSS", *IEE Proc., Microw. Antennas Propag.*, 143, pp. 193-200, 1995.
- [3] E. Martini, F. Caminita, M. Nannetti, and S. Maci, "Fast analysis of FSS radome for antenna RCS reduction", *Proc. IEEE Antennas Propag. Soc. Int. Symp.*, pp. 1801-1804, Jul. 2006.
- [4] 김상근, 이기태, 서일성, "배열 안테나용 AEM형 FSS 레이돔 설계", *한국전자과학회논문지*, 22(12), pp. 1180-1183, 2011년 12월.
- [5] U. d'Elia, G. Pelosi, C. Pichot, S. Selleri, and M. Zoppi, "A physical optics approach to the analysis of large frequency selective radomes", *Prog. Electromagn. Res.*, 138, pp. 537-553, 2013.
- [6] J. H. Kim, H. J. Chun, I. P. Hong, Y. J. Kim, and Y. B. Park, "Analysis of FSS radomes based on physical optics method and ray tracing technique", *IEEE Antenna Wireless Propag. Lett.*, 13, pp. 868-871, May 2014.
- [7] 김지형, 박용배, 전홍재, 홍익표, 김윤재, "배열 안테나가 내부에 있는 Von Karman 구조의 FSS 레이

뎀 전파 특성 해석", 한국군사과학기술학회 하계  
종합학술대회 논문 초록집, p. 128, 2014년 6월.  
[8] C. A. Balanis, *Advanced Engineering Electromagne-*

*tics*, 20. New York: Wiley, 1989.  
[9] B. A. Munk, *Frequency Selective Surfaces*, Wiley,  
2000.

≡ 필자소개 ≡

김 지 형



2009년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공  
학사)  
2009년 3월~현재: 아주대학교 전자공  
학과 석·박사 통합과정  
[주 관심분야] 전자장 해석, EMI/EMC

박 용 배



1998년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전  
자공학과 (공학사)  
2000년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전  
자공학과 (공학석사)  
2003년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전  
자공학과 (공학박사)  
2003년 2월~2006년 8월: KT 인프라연

구소 선임연구원

2006년 9월~현재: 아주대학교 전자공학과 부교수  
[주 관심분야] 전자장 해석, EMI/EMC