

60 GHz 대역용 도파관 급전 Radial Line Slot Array 안테나에 관한 연구

A Study on the 60 GHz Band Radial Line Slot Array Antenna Fed by a Rectangular Waveguide

김용훈 · 채희덕 · 이종원 · 박종국 · 김성철 · 남상욱

Yonghoon Kim · Heeduck Chac · Jungwon Lee · Jongkuk Park · Seong-Cheol Kim · Sangwook Nam

요 약

본 논문에서는 60 GHz 대역용 도파관 급전 radial line slot array (RLSA) 안테나를 설계, 제작하였다. Ewald 합 기법과 Shanks 변환을 이용한 효율적인 수치해석으로 RLSA 설계에 필수적인 슬롯을 통한 결합 특성을 계산하였고, 또한 기존의 급전 방식과는 달리 구형 도파관-radial line 변환구조를 이용한 구형 도파관 급전 구조를 사용하였다. 직경 10 cm의 크기로 제작된 원형(原型) 안테나의 측정 결과 60 GHz에서 31 dBi의 이득과 38 %의 효율을 나타내었다.

Abstract

A single-layered radial line slot array (SL-RLSA) antenna etched on a substrate and fed by a rectangular waveguide is presented in the 60 GHz band. The design curves are obtained by an efficient electromagnetic coupling analysis using Ewald Sum technique and Shanks transformation. The antenna has rectangular waveguide feed structure using a rectangular waveguide-to-radial line transition. The prototype antenna of 10 cm-diameter was tested and the gain of 31 dBi and the efficiency of 38 % were measured at 60 GHz.

Key words : RLSA, mm-wave antenna, Ewald sum method, Shanks' transform, rectangular waveguide feeding

1. 서 론

밀리미터파는 광대역의 주파수 특성을 제공할 뿐만 아니라 원격 탐사 등에 이용될 때 여러 가지 장점을 가지고 있어서 이 주파수 대역은 향후 가장 널리 쓰이는 핵심 주파수 대역이 될 것이다. 밀리미터파 주파수 대역에서도 안테나는 송신 시스템의 최종단, 수신 시스템의 최후단에 위치하여 전체 시스템의 SNR 및 잡음 성능에 가장 민감한 영향을 미치는 소자이다. 이러한 안테나는 미국, 일본 및 유럽에

서 군사용 및 우주 탐사, point-to-point 통신 등의 목적으로 60 GHz 이상의 주파수에서 일부 개발되어 사용하고 있거나 개발 중이나 국내에서는 거의 이에 대한 연구가 이루어지지 않고 있으므로 향후 다양한 밀리미터파 주파수 대역에서의 응용을 고려할 때 필히 개발되어야 할 분야로 생각된다. 이 중에서 특히 손실이 적고 이득이 큰 고효율의 안테나는 무선 LAN이나 차량 충돌 방지 시스템 등에서 중요한 요소인데, radial line slot array(RLSA) 안테나는 이와 같은 요구를 만족시킬 수 있는 안테나로 제안

본 연구는 동국대학교 밀리미터파 신기술 연구센터를 통한 한국과학재단의 우수연구센터 지원금에 의하여 수행되었습니다.
서울대학교 전기·컴퓨터 공학부(School of Electrical Engineering & Computer Science, Seoul National University)
· 논문 번호 : 20011016-146
· 수정완료일자 : 2002년 1월 18일

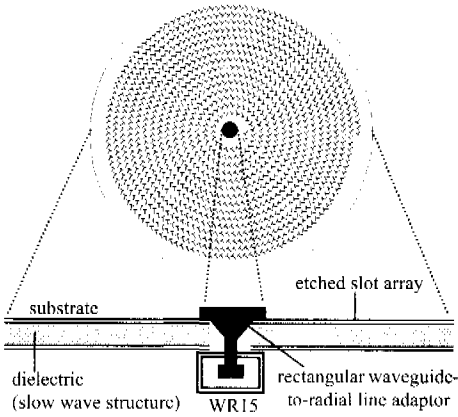


그림 1. Single-layered RLSA 안테나
Fig. 1. Single-layered RLSA antenna.

되고 있다^{[1],[2]}.

RLSA에서 슬롯을 통한 결합(coupling) 특성을 구하기 위한 해석 모델과 배열(array)의 설계 실차 등은 이미 잘 알려져 있으며 다양한 형태의 RLSA 안테나가 개발되고 있다^{[1],[3]}. 그러나 이들 안테나의 경우 결합 특성을 해석할 때 수치해석 관점에서의 효율성을 강조하지 않아 그린함수의 계산에 있어 느린 수렴 문제가 있다. 또한 동축선을 사용한 기존의 급전 방식은 밀리미터파 대역에서는 다루기가 힘들뿐만 아니라 손실이 커지고 비용이 증가할 수 있다. 본 논문에서는 이러한 점들을 고려하여 RLSA에서 결합 특성을 보다 효율적으로 구할 수 있는 방법과 60 GHz 대역에 적합한 새로운 급전 구조를 제안하였다. 그림 1에 설계할 원형 안테나의 구조를 나타내었다.

II. 슬롯을 통한 결합의 효율적인 해석

RLSA의 슬롯 배열을 설계하기 위해서는 우선 각각의 슬롯을 통한 결합 특성을 구해야 한다. 이때 앞선 연구^[1]에서와 같이 좁은 벽은 주기 경계 조건을 갖고 넓은 벽에는 주기적으로 슬롯이 배열되어 있는 그림 2와 같은 해석 모델을 사용하며, 도파관 내부 필드는 다음과 같이 표현된다.

$$E(z) \sim \exp\left(-\alpha z - jk_0 \frac{z}{\zeta}\right) \quad (1)$$

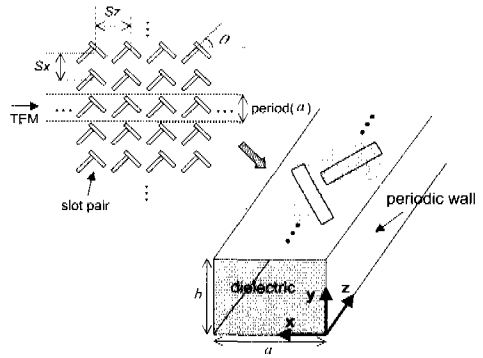


그림 2. 결합 특성 계산을 위한 모델
Fig. 2. Model for coupling analysis.

여기서 α (coupling factor)는 슬롯을 통한 결합으로 인한 내부 필드 진폭의 단위 길이당 감쇄 정도를, ζ (slow wave factor)는 내부 필드의 파장이 자유 공간에서의 파장에 비해 줄어드는 정도를 각각 나타낸다. 자장에 대한 적분 방정식과 각각의 영역에 대한 포텐셜 그린함수를 유도하고 모멘트 법을 이용하여 각 슬롯에서의 전장(또는 자기전류)을 구해 내게 된다. 여기서 주기성이 고려된 구형 도파관 그린함수의 경우 2차원 무한 급수의 형태로 표현되어 매우 느리게 수렴하는데, 본 연구에서는 구형 도파관 그린함수의 급수를 무한개의 영상 전원에 의한 포텐셜의 합으로 나타낸 후 Ewald함 기법을 이용하여 주어진 급수를 아래의 식과 같이 전개하였다^{[4]-[7]}.

$$G_{WC} = G_{WC1} + G_{WC2}$$

$$G_{WC1} = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{\epsilon_m \epsilon_n}{4ab\gamma_{mn}} f(k_{x_m}, x, x') h(k_{y_n}, y, y') \cdot$$

$$\times \left\{ \frac{\exp[\gamma_{mn} Z] \operatorname{erfc}[\gamma_{mn}/2E + ZE]}{\gamma_{mn}} + \frac{\exp[-\gamma_{mn} Z] \operatorname{erfc}[\gamma_{mn}/2E - ZE]}{\gamma_{mn}} \right\}$$

$$G_{WC2} = \frac{1}{4\pi} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{i=0}^1 A_i$$

$$\frac{\operatorname{Re}[\exp(jkR_{i,mn}) \operatorname{erfc}(R_{i,mn}E + jk/2E)]}{R_{i,mn}}$$

$$(i=0, 1) \quad (2)$$

여기서

f, h : 정현파(sinusoidal) 함수

a, b : 도파관 단면의 폭(x 방향)과 높이(y 방향)

$$R_{0, mn} = \sqrt{(x - x' + ma)^2 + (y - y' + 2nb)^2 + (z - z')^2}$$

$$R_{1, mn} = \sqrt{(x - x' + ma)^2 + (y + y' + 2nb)^2 + (z - z')^2}$$

$$\gamma_{mn} = \sqrt{k_{x_m}^2 + k_{y_n}^2 - k^2} \quad \text{축}(z) \text{ 방향 진파 상수}$$

$$k_{x_m} = \frac{2m\pi}{a}, \quad k_{y_n} = \frac{n\pi}{b}$$

$$\epsilon_i = \begin{cases} 1, & i=0 \\ 2, & i>0 \end{cases} \quad \text{Neumann 수}$$

$$Z = |z - z'|$$

$$A_i : \text{부호 상수}$$

위 식에서 E 는 Ewald합에서 나타나는 조절 변수로서 전체적인 계산량을 최소화할 수 있도록 적당한 값을 선택해 주어야 한다^[8]. 한편 Ewald 변환된 그린함수의 형태를 자세히 살펴보면 역시 무한 급수의 형태이지만 기본적으로 도파관 그린함수에 상보 오차 함수가 가중된 형태를 취하고 있음을 알 수 있는데, 상보 오차 함수(complementary error function) $erfc(x)$ 는 $\exp(-x^2)/x$ 의 비율로 감소하므로 위의 급수는 매우 빠르게 수렴하게 된다. 좀더 구체적으로 말하면 그린함수의 각 성분에서 G_{M0} 급수는 상보 오차 함수로 가중된 스펙트럴 영역 도파관 그린함수에 해당하며, G_{M2} 급수는 공간 영역 그린함수가 역시 상보 오차 함수로 가중된 형태이다. 따라서 전체적으로는 스펙트럴 영역과 공간 영역 그린함수가 혼합된 형태로 도파관 그린함수를 계산하도록 구성되어 있다. 이와 같은 두 영역의 혼합 계산은 주기적인 그린함수의 계산을 빠르게 하는 여러 기법에서 기본적으로 사용되고 있는 원리이다.

마찬가지로 반공간(half space) 영역의 경우도 자유 공간 그린함수의 급수를 효율적으로 계산하기 위한 가속화 방법이 필요한데, 여기서는 Shanks 변환을 이용한다^[9]. 이는 매우 느리게 수렴하는 급수의 부분합(partial sum)들로 이루어진 수열을 새로운 수열로 미선형 변환하여 작은 수의 부분합으로도 무한 급수의 수렴 값을 찾을 수 있고, 해석적인 변환 과정 없이 산술적으로 쉽게 구현할 수 있다.

한편 앞서 설명한 그린함수의 가속화 기법 외에, 본 논문에서는 수치해석의 효율을 최대화하고 특이점(singularity) 문제를 해결하기 위해 자기전류를 전

개할 때 entire domain 기저함수와 sub-domain 기저함수를 모두 사용하였다. 즉, 모멘트 법에서 임피던스 행렬을 계산할 때, non-self term의 경우 전원점과 관측점이 동일한 지점에 있을 때 발생하는 특이점이 존재하지 않으므로 단순히 entire domain 기저함수가 포함된 식을 수치적으로 적분함으로써 계산을 쉽게 할 수 있다. 그러나 self term 계산의 경우에도 entire domain 기저함수를 그대로 이용할 경우 특이점을 제거하기가 상당히 어렵게 된다. 그래서 entire domain 기저함수를 부분 선형 근사(piecewise linear approximation)하여 rooftop 기저함수를 사용하여 자기전류를 전개하는 방법을 이용한다. 이와 같이 sub-domain 기저함수를 사용하여 특이점에 해당하는 부분은 따로 뽑아 내어 해석적으로 계산하고 나머지 부분만을 수치적으로 계산하여 두 결과를 더해주는 방법을 이용할 경우, 이미 잘 알려진 적분 공식을 이용할 수 있으므로 보다 쉽게 행렬의 각 요소들을 계산할 수 있게 된다^[10].

이상에서 설명한 해석 방법은 보다 나은 정확성과 함께 계산에 필요한 노력이나 시간을 줄일 수 있다. 그림 3은 그림 2에서 도파관 길이 방향으로 9쌍의 동일한 슬롯을 배열하여 계산한 결합 특성이다.

III. 구형 도파관 급전 구조의 설계

기존의 RLSA 안테나의 경우 동축선을 이용하여 평행판의 중앙으로 급전하였다. 그러나 동축선은 상

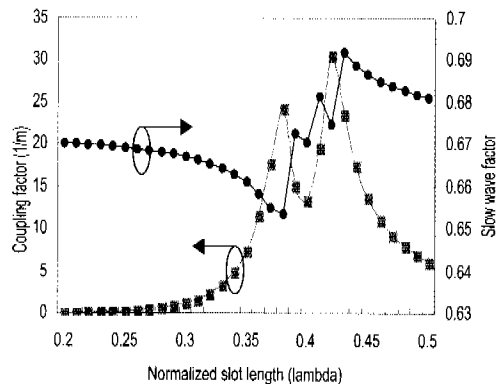


그림 3. 슬롯을 통한 결합 특성
Fig. 3. Coupling characteristics of slots.

대적으로 손실이 크고, 고가(高價)이며 다루기 힘들기 때문에 이를 이용한 급전 구조는 밀리미터파 대역에는 적절치 않다. 이런 이유로 대부분의 밀리미터파 대역용 트랜시버의 입·출력 포트가 표준 구형 도파관으로 이루어져 있다. 본 연구에서는 흔히 쓰이고 있는 동축선-구형 도파관 변환구조 (coaxial-to-waveguide transition)를 구형 도파관-평행판 변환구조(waveguide-to-radial line transition)에 응용하여 그림 4에서와 같은 변환기(adaptor) 구조를 제안하였다. 구형 도파관을 통해 입사된 파는 변환기에 의해 기판 쪽으로 결합된 후 평행판 가장자리로 진행하는 TEM파로 점차로 변하게 되고, 최종적으로 슬롯을 통해 방사(radiation)하게 된다. 한편, 급전을 위한 최적의 변환기 구조의 설계는 기판에 에칭된 슬롯 배열을 무시한다면 상용 필드 시뮬레이터로 가능하며, 본 논문에서는 CST社의 MicroWave Studio와 Ansoft社의 HFSS를 이용하였다. 설계된 변환기는 모의실험 결과 60 GHz에서 -15 dB이하의 반사 특성을 보였고, 이와 함께 그림 5에서처럼 변환기에 의해 변환된 파는 유전체 내에서 대칭적인 필드 분포를 유지하며 진행함을 확인할 수 있었다.

IV. 제작 및 측정

II에서 제안한 해석 방법으로 구한 결합 정보를 이용하여 슬롯 배열을 설계하고, III에서 제안한 새로운 급전 구조를 가진 원형 편파 RLSA 안테나를 제작하였다. 두 개의 평행판 사이에 유전체를 넣는 기존의 RLSA 안테나와 달리, duroid 기판($\epsilon_r=2.2$)

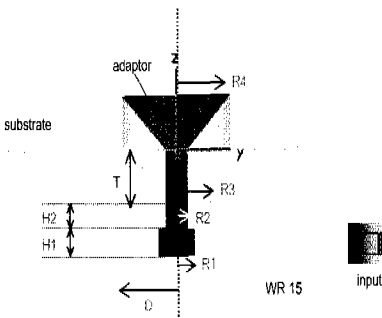


그림 4. 모의 실험을 위한 급전 구조
Fig. 4. Feed structure for simulation.

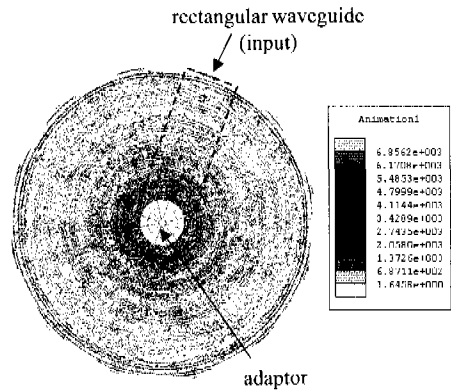


그림 5. 변환 구조 후의 필드 분포 (위에서 본 그림)
Fig. 5. Field distribution after transition(top view).

을 써서 그 위에 슬롯 배열을 화학적으로 에칭하는 방법을 이용함으로써 제작이 용이하도록 하였다. 그림 6은 직경 10 cm의 크기로 실제 제작된 원형 안테나의 사진이다. 변환기의 S_{11} 을 HP8510XF를 이용하여 측정해 본 결과, 그림 7에서처럼 60 GHz 부근에서 -14 dB 정도의 반사 특성을 얻을 수 있었다. 그림에서 보이는 설계 주파수 아래에서의 ripple은 모의 실험에서는 고려될 수 없었던 슬롯 배열의 영향이다. 즉, 설계 주파수 아래에서는 슬롯이 상대적으로 짧게 보이므로 결합이 작아지고 이로 인해 기판 가장자리에서의 반사로 인한 효과가 상대적으로 커지게 되어 ripple이 커지게 되며, 설계 주파수 이상에서는 반대로 반사보다는 슬롯을 통한 방사(radiation)효과가 커지게 되어 ripple이 작은 것으로 생각된다. 또한 이러한 반사 특성은 기판 가장 자리

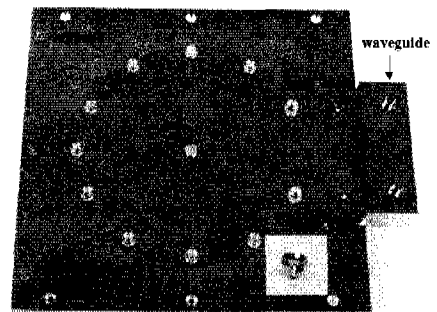


그림 6. 제작된 안테나 사진
Fig. 6. Photograph of fabricated antenna.

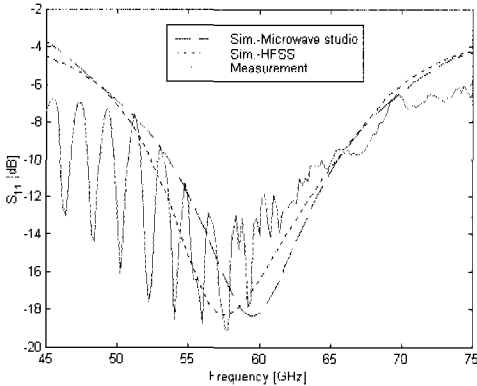


그림 7. 측정된 급전 구조의 반사 특성
Fig. 7. Measured reflection of the feeder.

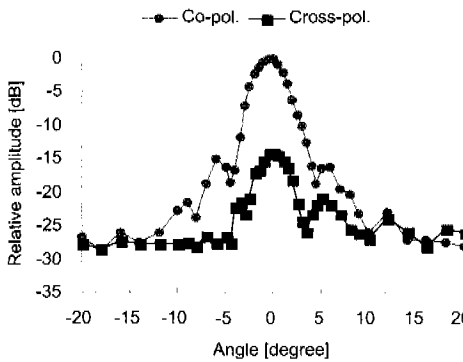


그림 8. 측정된 안테나 방사 패턴
Fig. 8. Measured antenna radiation pattern.

에 정합을 위한 슬롯을 배열하거나 흡수체 등을 이용함으로써 개선할 수 있다^{[1]-[3]}. 한편 그림 8은 측정된 안테나 방사 패턴으로 거의 대칭적인 빔 패턴과 함께 빔폭 4°, 부엽 레벨(first sidelobe level) -14 dB 이하, 교차편파 레벨(cross polarization level) -14 dB, 이득 31 dBi, 효율 38 %가 각각 측정되었다.

V. 결 론

60 GHz 대역 시스템용 구형 도파관 급전 RLSA 안테나를 설계, 제작하였다. 두 개의 다른 가속화 기법과 두 개의 다른 지터함수를 적절히 이용함으로써 RLSA의 설계에 필요한 슬롯을 통한 결합 특성을 정확하고 빠르게 해석하였다. 안테나의 급전 방식에서도 동축선 구조를 간단한 변환기를 이용한

구형 도파관 구조로 대체함으로써 손실과 비용을 줄이고 다른 밀리미터파 대역 부품들과의 연결이 쉽도록 하였다. 기판을 이용하여 제작한 안테나의 측정 결과 만족할 만한 성능을 얻을 수 있었고, 이는 wireless LAN이나 차량 충돌 방지용 시스템 등 향후 다양한 밀리미터파 대역의 응용을 고려할 때 고효율 안테나의 제작 가능성과 그 효율성을 제시하였다.

참 고 문 헌

- [1] J. Hirokawa, M. Ando, and N. Goto, "Analysis of slot coupling in a radial line slot antenna for DBS reception", *IEE Proc. Pt. H*, vol. 137, no. 5, pp. 249-254, 1990.
- [2] M. Takahashi, J. Takada, M. Ando and N. Goto, "A slot design for uniform aperture field distribution in single-layered radial line slot antennas", *IEEE Trans. Antennas and Propagat.*, 1991, AP-39, (7), pp. 954-959.
- [3] A. Akiyama, T. Yamamoto, M. Ando and N. Goto, "Numerical optimisation of slot parameters for a concentric array radial line slot antenna", *IEE Proc. -Microw. Antennas Propagat.*, vol. 145, no. 2, 1998.
- [4] R. E. Jorgenson and R. Mittra, "Efficient calculation of the free-space periodic Green's function", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 38, pp. 633-642, May 1990.
- [5] K. E. Jordan, G. R. Richter and P. Sheng, "An efficient numerical evaluation of the Green's function for the Helmholtz operator on periodic structures", *J. Comp. Phys.* vol. 63, pp. 222-235, 1986.
- [6] P. P. Ewald, "Die berechnung optischer und elektrostatiscen gitterpotentiale", *Ann. Phys.*, vol. 64, pp. 253-268, 1921.
- [7] 박면주, "Ewald합 기법을 이용한 마이크로파 차폐 및 주기구조의 효율적인 해석 연구", 박사학위논문, 서울대학교, 1998.
- [8] A. Kustepeli, and A. Q. Martin, "On the split-

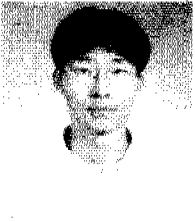
ting parameter in the Ewald method", *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, vol. 10 no. 5, pp. 168-170, 2000.

[9] S. Blume and V. Krebs, "Numerical evaluation of dyadic diffraction coefficients and bistatic radar cross sections for a perfectly conducting

semi-infinite elliptic cone", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 46, no. 3, Mar. 1998.

[10] 이중원, 김용훈, 박종국, 남상욱, "RLSA 설계를 위한 주기적으로 배열된 슬롯을 통한 결합의 효율적인 해석," 한국전자과학회 논문집, vol. 12, no. 6, pp. 931-938, 2001년 10월.

김 용 훈



2000년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
 2000년 3월~현재: 서울대학교 전기·컴퓨터 공학부 석사과정
 [주 관심분야] 전자기 수치 해석, 안테나 해석 및 설계

박 종 국



1995년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
 1997년 2월: 서울대학교 대학원 전자공학과 (공학석사)
 2001년 8월: 서울대학교 대학원 전기·컴퓨터 공학부 (공학박사)
 2001년 11월~현재: LG 이노텍 전분화그룹 선임 연구원
 [주 관심분야] 전자기 수치 해석, 안테나 설계, 마이크로파 및 밀리미터파 수동회로 해석 및 설계

채 희 덕



1999년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학사)
 2001년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학석사)
 2001년 3월~현재: 서울대학교 전기·컴퓨터 공학부 박사과정
 [주 관심분야] 전자기 수치 해석, 안테나 해석 및 설계

김 성 철



1984년: 서울대학교 전기공학과 (공학사)
 1987년: 서울대학교 전기공학과 (공학석사)
 1995년: Polytechnic University (공학박사)
 현재: 서울대학교 전기·컴퓨터 공학부 조교수
 [주 관심분야] 전파 전파, 통신 채널 모델링

이 중 원



1998년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학사)
 2000년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학석사)
 2000년 3월~현재: 서울대학교 전기·컴퓨터 공학부 박사과정
 [주 관심분야] 전자기 수치 해석, 안테나 해석 및 설계

남 상 욱



1981년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
 1983년 2월: 한국과학기술원 전기전자공학과 (공학석사)
 1983년 2월~1986년 8월: 금성사 중앙연구소 주임연구원
 1989년 5월: 미국 Texas 주립대학교 전기공학과 (공학박사)
 1989년 6월~1989년 9월: 미국 Texas 주립대학교 Post Doc. 연구원
 1989년 9월~1990년 1월: 금성정밀 연구소 선임 연구원
 1990년~현재: 서울대학교 전기·컴퓨터 공학부 교수
 [주 관심분야] 전자파 수치 해석, 초고주파 측정, 안테나 및 초고주파 회로 설계