

유전체가 삽입된 원통형 공진기에서 공진주파수의 모드 구분

Mode Identification of Resonant Frequencies for a Dielectric Loaded Circular Cylindrical Cavity

김진국* · 김동규* · 최홍주* · 허 정* · 이상영**

Jin-Kook Kim* · Dong-Kyu Kim* · Hong-Ju Choi* · Jung Hur* · Sang-Young Lee**

요 약

본 논문에서는 유전체가 삽입된 원통형 공진기에서 공진주파수들의 모드를 구분하는 방법에 대하여 기술한다. 공진주파수들의 모드를 구분하기 위해 먼저 빈 원통형 공진기에서 계산된 공진주파수와 EM 시뮬레이터인 Microstripes의 시뮬레이션 결과 값을 비교하였다. TE 모드는 z방향으로 여기시켰을 때, TM 모드는 ϕ 방향으로 여기시킨 경우와 비교하여 구분할 수 있었다. 가운데 유전체가 삽입된 원통형 공진기에 이 결과를 적용해 실험결과와 비교하여 모드를 구분하였다. 이 방법이 올바른 지를 확인하기 위해 유전체의 높이를 변화시키며 모드 추적을 하였다. TE_{011} 모드는 공진주파수의 변화가 커서 다른 공진 모드와 순서가 바뀌었으나, TE_{111} 모드와 TE_{211} 모드는 공진주파수의 변화가 적었다.

Abstract

This paper describes the mode identification of resonant frequencies in dielectric loaded circular cylindrical cavity. To identify the mode of resonant frequencies, the calculated resonant frequencies were compared with the simulated ones in the air-filled circular cylindrical cavity by Microstripes EM simulator. With z-oriented magnetic field excitation, we could get only TE mode resonance, while all the modes including TM mode were observed with ϕ -oriented magnetic field excitation. We could identify the modes with the two excitation methods. We applied the identification method to a dielectric loaded circular cylindrical cavity and compared these results with experimental ones. To certify the method, we traced resonance frequencies with varying the dielectric height. we observed that the resonance of TE_{011} mode was changed dramatically while the variation of the TE_{111} and TE_{211} modes are relatively small.

「본 연구는 정보통신연구관리단의 대학기초연구지원 및 과학기술부의 지원에 의해 수행되었음.」

*건국대학교 전자·정보통신공학과(Dept. of Electronics, Information and Communication Engineering., Konkuk University)

**건국대학교 물리학과(Dept. of Physics, Konkuk University)

· 논문 번호 : 981028-109

· 수정완료일자 : 1999년 3월 11일

I. 서 론

저손실, 높은 Q값, 온도 안정성 때문에 높은 유전율을 갖는 물질로 이루어진 구조에 대한 관심이 고조되었으며, 많은 사람들에 의해 연구가 수행되고 있다^{[1]-[5]}. 그 중 관심 있는 응용분야 중 하나가 유전체가 삽입된 공진기이다. 유전체가 삽입된 공진기는 높은 Q값과 적은 손실 때문에 주파수가 안정화된 오실레이터나 필터 등에 응용되며, 근래에는 초전도박막과 결합하여 아주 높은 Q값을 갖는 소자에 적용함으로써 이동통신이나 위성통신을 위한 기지국 등에 응용되고 있다.

K. A. Zaki^[1], Z. Y. Shen^[2], S. Y. Lee^[3] 등은 각자 그들의 전자계 해석방법을 유전체가 삽입된 공진기에 적용하여 공진주파수를 구하고, 공진기의 여러 가지 특성을 설명하였다. 그러나, 두 개 이상의 매질로 채워진 원통형 공진기에서 각 매질에 대한 적절한 해석방법과 경계조건을 적용하기가 어렵고, 복잡한 초월함수 방정식으로 이루어져 있기 때문에 정확한 공진주파수를 구하기가 쉽지 않다. 또한, 공진 모드에 따라 유전체가 삽입된 공진기 내부의 전자계가 달라지기 때문에 공진기에 흐르는 전류세기, 전력전달 특성, 공진주파수가 변하므로 공진주파수를 정확히 구하여 공진주파수의 모드를 구분하는 것은 중요한 문제이다.

본 논문에서는 유전체가 삽입된 원통형 공진기에서 공진주파수를 시뮬레이션을 통해 구하고, 공진주파수의 모드구분에 대하여 논의하였다. TM모드와 TE모드의 모드구분 방법을 찾기 위해 빈 원통형 공진기에서 계산된 모드별 공진주파수와 EM 시뮬레이터인 마이크로스트라이프를 이용하여 전계와 자계를 각각 ρ , ϕ , z 방향으로 여기시켜 시뮬레이션한 결과를 비교하였다. TM모드와 TE모드를 구분할 수 있는 적절한 여기방법을 유전체가 삽입된 공진기에 적용하여 공진주파수를 구한 후 실험결과와 비교하여 공진주파수의 모드를 예측하

였다. 예측된 공진주파수의 모드가 올바른 지를 확인하기 위해서 유전체의 높이를 0mm에서 5mm까지 조금씩 변화시켜 모드추적을 하였다.

II. 유전체 디스크가 삽입된 원통형 공진기의 구조

모드구분을 하고자 하는 유전체가 삽입된 원통형 공진기는 그림 1과 같이 가운데 유전체 디스크가 삽입되고, 외부는 도체로 이루어져 있다. 즉, 도체로 된 원통형 공동 안에 유전율 $\epsilon_r = 9.4$ 인 유전체 디스크가 축방향으로 중심을 이루며 삽입된 구조를 갖는다. 사용된 유전체 디스크는 단결정 사파이어이고, 도체는 무산소동이다. 공동 안에서 유전체 디스크가 삽입된 지역 외의 영역은 공기로 가득 차 있다. 유전체의 높이(l')와 반경(a)은 각각 5 mm, 2.5 mm이며, 공진기의 높이($L' + l'$)와 반경(d)은 15 mm와 7.9 mm이다. 원통벽면의 반대방향에 두 개의 작은 구멍을 뚫어 구리 동축케이블의 끝을 직선도선이나 루프로 만들어 자기나 전기적 결합을 할 수 있도록 하였다.

이와 같이 함으로서 유전체가 원통형 공진기 안에 삽입될 경우 유전체의 높이와 반지름 방향에 대해 대칭이 되도록 하여 유전체에 적절한 전력이 전달될 수 있도록 한 것이다. 이때 여기되는 위치는 높이가 밑바닥으로부터 2.5 mm인 측면 벽의 안

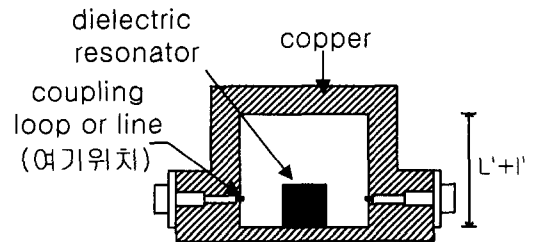


그림 1. 유전체 디스크가 삽입된 원통형 공진기의 구조
Fig. 1. The configuration of a dielectric disk loaded circular cylindrical cavity.

쪽이다. 직선도선이나 루프의 모양, 길이 등을 변화시켜 여기방법을 바꿀 수 있다.

III. 공진주파수들의 모드 구분

3-1 빈 원통형 공진기의 공진주파수

그림 1을 다시 그리면 그림 2와 같은 구조이다. 그림 2와 같이 유전체 디스크가 삽입된 원통형 공진기에서 공진주파수를 구하기 위해 고주파 구조의 시뮬레이터인 Microstripes^[6]를 사용하였다. Microstripes는 3차원 구조의 마이크로파 특성을 해석하기 위하여 TLM(Transmission Line Modeling)방법을 사용한다. 마이크로스트라이프에 의해 시뮬레이션된 구조는 그림 2와 같이 완전 도체로 된 공동 안에 유전율 $\epsilon_r = 9.4$ 인 유전체 디스크가 삽입된 구조와 유전체가 없는 빈 원통형 공진기이다.

먼저 TM모드와 TE모드를 구분하는 방법을 찾기 위해 그림 3과 같이 모드별 공진주파수의 계산이 정확한 빈 원통형 공진기에서 식 (1)과 식 (2)로부터 구한 TM모드와 TE모드의 공진주파수들을 전계와 자계를 각각 ρ, ϕ, z 방향으로 여기방향을 바꾸어가면서 EM 시뮬레이터인 마이크로스트라이프

스를 이용하여 시뮬레이션한 결과와 비교하였다.

$$f_{nml} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\mu_r\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{x_{nm}}{d}\right)^2 + \left(\frac{l\pi}{L'+l'}\right)^2} \tag{1}$$

$$f_{nml} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\mu_r\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{x_{nm}'}{d}\right)^2 + \left(\frac{l\pi}{L'+l'}\right)^2} \tag{2}$$

n 은 파가 ϕ 방향으로 필드변화, m 은 ρ 방향으로 필드변화, l 은 원통축방향으로 필드변화된 회수를 나타낸다. d 는 공동의 반지름을, $L'+l'$ 는 축방향의 길이이다.

표 1은 빈 원통형 공진기에서 정확히 계산된 TM모드와 TE모드의 공진주파수와 전계와 자계를 각각 ρ, ϕ, z 방향으로 바꾸어가면서 여기시켜 시뮬레이션한 결과를 보여주고 있다.

표 1을 보면 순수한 TE모드는 z 방향으로 자계와 ϕ 방향으로 전계를 여기시킬 때 발생함을 알 수 있다. 그러나, ϕ 방향으로 전계를 여기시킨 경우는 신호의 세기가 적어 중간에 모드들이 사라지고 있으며, 그림 1에서 실험시 원통측면에서 여기를 줄 경우 ϕ 방향으로 전계를 쉽게 여기시킬 수 없기 때문에 TE 모드를 구하고자 할 경우에는 z

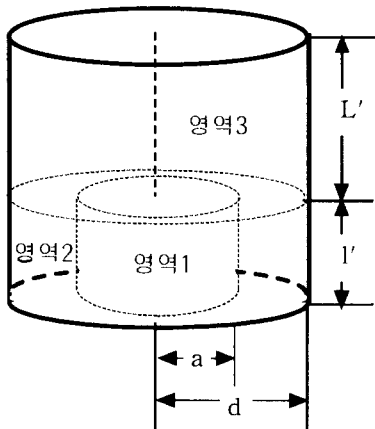


그림 2. 유전체가 삽입된 원통형 공진기의 구조
Fig. 2. The configuration of dielectric disk loaded circular cylindrical cavity.

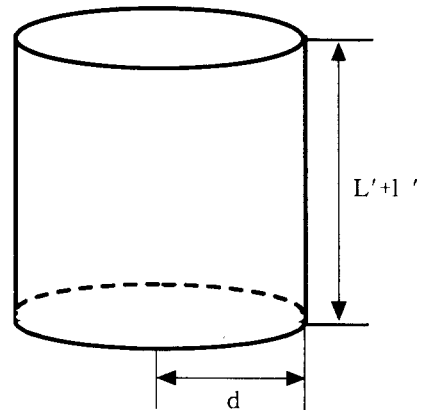


그림 3. 빈 원통형 공진기의 구조
Fig. 3. The configuration of air-filled circular cylindrical cavity.

표 1. 계산된 공진주파수와 시뮬레이션된 결과 비교

Table 1. Comparison between the calculated resonant frequencies and the simulated ones.

계산치 [GHz]		시뮬레이션 결과 [GHz]					
TM모드(차수)	TE모드(차수)	자계 여기			전계 여기		
		H_ρ^{**}	H_ϕ^*	H_z^*	E_ρ^{***}	E_ϕ^{****}	E_z^{****}
14.534 (010)			14.567				14.550
	14.961 (111)	14.874	14.836	14.873	14.888	14.843	
17.642 (011)			17.622		17.652		17.639
	20.994 (211)	20.636	20.958	20.636	20.948	20.621	
	22.887 (112)	22.784	22.707	22.786	22.791	22.784	
23.158 (110)		23.222	23.192				23.189
24.724 (012)			24.669		24.609		
25.225 (111)	25.225 (011)	25.163	25.226	25.151	25.206	25.133	25.233
	27.217 (212)	26.902	26.925	26.641	26.908		
	27.290 (311)		27.112	26.869	27.124	26.869	
30.599 (112)	30.599 (012)	30.504	30.530	30.519	30.511	30.518	30.532
31.039 (210)		31.140	31.027				31.028
	31.997 (113)		31.907	31.505	31.911	31.917	
	32.322 (312)			32.710		32.728	
32.610 (211)		31.935	32.576				32.576
33.335 (013)		32.604			33.118		
33.363 (020)			33.422		33.466		33.420
	33.739 (121)	33.608	33.641	33.613		33.610	
34.829 (021)			34.853				34.852
	35.224 (213)			34.829	35.089	34.829	
36.925 (212)		36.924	36.854		36.825		36.872

* pA/m의 단위를 갖는 출력자계, ** fA/m의 단위를 갖는 출력자계
 *** pV/m의 단위를 갖는 출력전계, **** fV/m의 단위를 갖는 출력전계

방향으로 자계를 여기시킬 때가 가장 적당하다. 이 경우 상대적으로 자계의 세기가 다른 여기 결과에 비해 크므로 순수하게 TE모드만이 발생된다.

순수한 TM모드는 전계를 z 방향으로 여기시킬 때 나타나고 있으나 신호의 세기가 작고, 그림 1의 구조에서 실험시 전계를 z 방향으로 여기시키기가

힘들기 때문에 TM모드를 여기하는 방법으로는 적당하지가 않다. 자계를 ϕ 방향으로 전계를 ρ 방향으로 여기시켰을 때 TE 모드와 TM모드가 섞여서 나오는 것을 볼 수 있다. 자계를 ϕ 방향으로 여기시킬 경우는 TM모드의 세기가 큰 반면 TE모드의 공진주파수에서는 세기가 적은 신호가 발생되어

표 2. 유전체 디스크가 삽입된 원통형 공진기에서 실험값과 시뮬레이션 값의 비교

Table 2. The comparison of resonant frequencies between the experimented results and the simulated ones in the dielectric disk loaded circular cylindrical cavity.

실험값 [GHz]	시뮬레이션 결과 [GHz]	
	H_ϕ	H_z
	10.848	
12.988	13.134	13.180
15.831	15.947	
16.588	16.154	16.160
17.788		17.944
18.488	18.991	19.016
	20.616	20.414
	21.753	21.727

쉽게 TM모드와 TE모드를 구분할 수 있다. 반면, 전체를 ρ 방향으로 여기시킬 경우는 표 1에 나타난 것처럼 중간에 모드들이 사라져 구분이 어렵다. 즉, TM모드는 자계를 ϕ 방향으로 여기시킨 경우가 모드를 구분하기에 더 알맞다.

결국, 그림 3에서 자계를 z 방향으로 여기시킬 경우 순수 TE모드를, 자계를 ϕ 방향으로 여기시킬 경우 TM모드를 구분해 낼 수 있음을 알 수 있다.

3-2. 유전체 디스크가 삽입된 원통형 공진기의 공진주파수

표 2는 반 원통형 공진기에서 자계를 z 방향으로 여기시킬 경우 순수 TE모드가 발생하고, 자계를 ϕ 방향으로 여기시킨 경우와 비교하여 TM모드를 구분해 낼 수 있다는 사실을 이용하여 그림 1

표 3. 유전체의 높이를 변화시킴에 따라 나타나는 공진주파수의 모드변화

Table 3. The mode variation of resonant frequencies on the height of dielectric resonator.

모드 높이[mm]	공진주파수[GHz]									비 고
	TM_{010}	TE_{111}	TM_{011}	TE_{211}	TE_{112}	TM_{110}	TM_{012}	TE_{011}	TE_{311}	
0	14.534	14.961	17.642	20.994	22.887	23.158	24.724	25.225	27.290	계산값
0		14.873		20.636	22.786			25.151	26.869	
0.5		14.893		20.763	22.756			25.174	26.942	
1		14.881		20.761	22.528	22.907		25.156	26.935	
1.3		14.853		20.755	22.781	21.431	24.114	25.132	26.898	
1.6		14.802		20.743	22.669		23.886	24.966	26.429	
2		14.728		20.729	22.522		23.773	24.379	25.514	
2.3		14.614		20.712	22.319		23.261	23.738	24.697	
2.6		14.468		20.688	22.114			22.114	24.235	
3		14.109	16.638	20.633	21.564			20.633	23.732	
3.3		13.924	16.454	20.599	21.240			19.833	23.631	
3.6		13.746	16.377	20.568	20.789			19.360	23.306	
4		13.584	16.309	20.529	20.529			18.929	22.783	
4.3		13.439	16.194	20.468	20.255			18.701	22.489	
4.6		13.303	16.193	20.450	19.500			18.231	21.975	
5		13.180	16.160	20.414	19.016			17.944	21.727	

과 같이 유전체 디스크가 삽입된 원통형 공진기에서 자계를 각각 z 방향과 ϕ 방향으로 여기시켜 발생한 TE모드와 TM 모드의 공진주파수를 실험 결과와 비교한 것이다. 실험 값은 루프의 면을 원통의 반지름과 수평을 이루도록 한 후 측정된 결과이다. 표 2에서 공진주파수는 실험값과 시뮬레이션 결과가 큰 오차가 없이 나타나고 있는 것을 볼 수 있다. 빈 원통형 공진기에서와 같이 순서대로 공진주파수가 발생된다고 할 때, 각 공진주파수에 순서대로 모드 번호를 부여함으로써 공진주파수의 모드를 예측해 볼 수 있다.

유전체 디스크가 삽입된 공진기의 경우 공진주파수를 정확히 계산하기도 어렵고, 계산된 공진주파수가 정확한 값인가를 확인하기가 어려우므로, 예측된 공진주파수의 모드가 올바른지 확인하기 위하여 유전체의 높이를 계산치가 정확한 빈 원통형 공진기로부터 $l' = 5 \text{ mm}$ 까지 서서히 변화시키면서 TE모드를 여기시켜 공진주파수의 모드 변화를 추적하여 보았다.

표 3은 유전체의 높이를 변화시킬 때 나타나는 공진주파수들의 모드 변화를 보여주고 있다. 그림 4에서 알 수 있듯이 유전체의 높이가 커짐에 따라 TE_{011} 모드는 TE_{112} 와 TE_{211} 모드사이에서 교차가 일어나 모드의 순서가 바뀌는 것을 볼 수 있다. 즉, 표 2에서처럼 빈 원통형 공진기에서와 같이 공진주파수가 발생한 순서대로 모드 번호를 부여하면 공진주파수의 모드구분이 잘못될 수 있음을 보여준다. 또한, TE_{111} 과 TE_{211} 모드는 다른 모드와는 달리 유전체의 높이가 변화함에 따라 공진주파수의 변화가 크지 않아 모드변화가 적음을 알 수 있다.

표 3에서 그림 2와 같이 가운데 유전체가 삽입된 구조에서 빈 원통형 공진기에서 z 방향으로 자계를 여기시킬 때 순수한 TE모드가 발생하는 것과는 달리 중간에 TM모드가 발생하였다. 이것은 가운데 유전체 디스크의 영향으로 인해 순수한 TE모드가 아닌 기생적인 TM모드가 발생한 것이

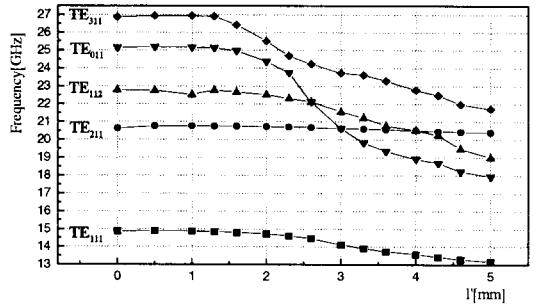


그림 4. 유전체의 높이변화에 따른 TE모드 공진주파수의 변화

Fig. 4. The variation of the resonant frequencies on the height of dielectric resonator in the dielectric loaded circular cylindrical cavity.

다. 이것은 유전체의 높이를 변화시키고 여기위치는 고정시켰기 때문에 여기되는 상대적인 위치에 따라 유전체에 의해 공진기 내부의 필드형태가 달라져 중간에 간헐적으로 TM모드가 나타난 것이다.

IV. 결 론

유전체가 삽입된 원통형 공진기에서 공진주파수를 구하고, 공진주파수들의 모드를 구분하여 보았다. TM모드와 TE모드를 구분할 수 있는 방법을 찾기 위해 빈 원통형 공진기에서 정확히 계산된 공진주파수와 EM 시뮬레이터를 이용하여 시뮬레이션한 결과를 비교하였다.

빈 원통형 공진기에서 z 방향으로 자계를 여기시켰을 때 TE모드를, ϕ 방향으로 자계를 여기시킬 때 TM모드를 구분할 수 있음을 알았다.

이 방법을 유전체가 삽입된 원통형 공진기에 적용하여 공진주파수를 구한 후 실험치와 비교하였다. 빈 원통형 공진기에서와 같이 발생한 공진주파수에 모드번호를 부여하여 유전체가 삽입된 공진기에서 공진주파수의 모드를 예측하였다. 그러나, 공진주파수의 모드예측이 올바른 지를 확인하기 위해 유전체가 삽입된 원통형 공진기에서 유전체

의 높이를 조금씩 변화시키면서 공진주파수의 모드를 추적해 본 결과 TE_{011} 모드는 공진주파수의 변화가 커서 다른 공진모드와 공진주파수의 순서가 바뀌어 나타나고 있으나, TE_{111} 과 TE_{211} 모드는 공진주파수의 변화가 적어 모드의 변화가 적음을 알 수 있었다. 위의 결과 유전체가 삽입된 원통형 공진기에서 기존의 K. A. Zaki^[1]나 S. Y. Lee^[3]와 같이 수치해석을 통해 공진주파수만을 구함으로써 정확히 알 수 없었던 공진주파수의 모드 변화를 살펴볼 수 있었다.

본 논문에서 수행한 유전체가 삽입된 원통형 공진기에서 모드구분 방법은 유전체가 삽입된 공진기에서 Q값, 전류밀도, 공진기의 표면저항 등과 같은 특성을 계산하기 위해 가장 적절한 모드의 공진주파수를 구하는 데 유용할 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

[1] K. A. Zaki, A. E. Atia "Modes in Dielectric-Loaded Waveguide and Resonators", *IEEE*

Trans. on Microwave Theory and Techniques, vol. MTT-31, no. 12, December 1983.

[2] Z. Y. Shen, C. Wilker, P. Pang, W. L. Holstein, D. Face and D. J. Kountz, "High-Tc superconducting sapphire microwave resonator with extremely high Q-values up to 90 K", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 40, pp. 2424-2432, December 1992.

[3] S. Y. Lee, B. J. Soh, et al, "Use of a Dielectric-loaded Cylindrical Cavity in Measurements of the Microwave Surface Resistances of High-Tc Superconducting Thin Films", *IEEE Transaction on Applied Superconductivity*, 1997.

[4] D. Kaifez, P. Guillon, *Dielectric Resonators*, Artech House, 1986.

[5] R. F. Harrington, *Time Harmonic Electromagnetic Fields*, McGraw-Hill, 1961.

[6] KCC, Micro-Stripes, Version 3.0.

김진국



1997년 2월: 건국대학교 전자공학과 (공학사)
 현재: 건국대학교 대학원 전자·정보통신 공학과 석사과정
 [주 관심분야] 안테나 및 전파전파, 마이크로파 회로설계 및 소자 제작 등

최홍주



1993년 2월: 건국대학교 전자공학과 (공학사)
 1995년 2월: 건국대학교 대학원 전자공학과(공학석사)
 현재: 건국대학교 대학원 전자·정보통신 공학과 박사과정
 [주 관심분야] 안테나 및 전파전파, 이동통신, 마이크로파 회로 설계 등

김동규



1997년 2월: 건국대학교 전자공학과 (공학사)
 1999년 2월: 건국대학교 대학원 전자정보통신공학과(공학석사)
 [주 관심분야] 안테나 및 전파전파, 마이크로파 회로설계 등

허 정



1981년: 서울대학교 전자공학과(공학사)

1983년: 서울대학교 대학원 전자공학과(공학석사)

1991년: 서울대학교 대학원 전자공학과(공학박사)

현재: 건국대학교 전자·정보통신공학과 부교수

[주 관심분야] 안테나 및 전파전파, 마이크로파 회로설계, 마이크로파 소자 등

이상영



1979년 2월: 서울대학교 물리학과 (이학사)

1984년 12월: 미국 오하이오 주립대학교 물리학과 M.S.

1987년 12월: 미국 오하이오 주립대학교 Ph.D(실험고체물리학 전공)

1992년 5월: 한국과학기술연구원 물리전자부 선임연구원

현재: 건국대학교 물리학과 부교수 및 한국초전도학회 편집이사

[주 관심분야] 고온초전도체의 마이크로파소자응용 및 특성 평가, 고온초전도체-유전체 접합을 이용한 고주파소자응용, 고온초전도체 박막 및 고주파소자의 제작