

# 동축선로 공진기를 이용한 필터의 수동 상호변조 왜곡신호 해석 및 최적화

## Analysis and Optimization of Passive Intermodulation Distortion in Microwave Filter using Coaxial Line Resonator

조인귀 · 김진태 · 정명영 · 최태구

In-Kui Cho · Jin Tae Kim · Myung Yung Jeong · Tae Goo Choy

### 요약

본 논문에서는 동축선로 공진기를 이용한 필터에서 발생하는 수동 상호변조 왜곡신호의 분석 및 최적화 기법을 제시하였다. 개발한 시뮬레이션 기법은 필터의 치수 변화를 통해 필터의 선형응답 특성에 영향을 주지 않고 수동 상호변조 왜곡신호 수준을 낮출 수 있다. 필터의 수동 상호변조 왜곡신호 수준은 필터를 형성하는 각 공진기를 통해 흐르는 전류의 양에 의해 결정되며, 이러한 전류의 제어를 통해 공진기형 필터의 수동 상호변조왜곡신호를 감소시킬 수 있다.

### Abstract

In this paper, the technique of analysis and optimization on the Passive Intermodulation(PIM) in a filter using coaxial transmission resonator, is presented. The developed simulation technique can reduce PIM power without the degradation of the linear filter response, through the variation of filter dimensions. The increase of PIM in filter is depended on currents flowing through each resonator forming filter. The reduction of these currents therefore makes the reduction of the PIM power.

### I. 서론

수동RF 부품에 두 신호 이상의 RF 신호가 인가 될 때 신호 주파수들이 서로 간섭 현상을 일으켜 원치 않는 기생 신호를 발생시키는 것을 수동 상호변조신호(PIM : Passive Intermodulation)라 하며, 이러한 PIM의 발생은 그 시스템의 채널 용량 및 통화품질에 제한을 가져 올 수 있다<sup>[1],[2]</sup>. 실제로 유럽의 통신 시스템인 GSM에서는 이와 같은 문제로 2개의 채널을 비워 서비스 채널에서 문제가 발생하면 비워둔 채널로 주파수 대역을 옮겨 PIM에 장애를 피하고 있다. 이는 주파수 자원 이용 측면에서 심각한

낭비이고, 서비스 용량 감소를 의미한다. 따라서 현재 세계적인 통신 시스템 업체에서는 PIM을 자체 규격으로 규정하여 측정을 수행하고 있다. 또한 국제 표준화 기구인 IEC에서는 2000년 11월에 RF Coaxial Cable, Filter 및 안테나의 PIM 측정과 관련한 IEC 62037을 제정하였다.

수동소자에서 발생하는 PIM은 주로 filtering 후에 동축선로, 필터, 듀플렉서, 도파관, 안테나 등 RF 수동소자에서 발생되므로 그 제어가 매우 어려운 실정이다. 미국의 NRL에서는 PIM 발생 기구를 연구하였으며, 1년간 기존의 RF 커넥터로 실험을 통해 이들을 검증하고 PIM 모델링을 수행하였다<sup>[3]</sup>.

한국전자통신연구원(Electronics and Telecommunications Research Institute)

· 논문 번호 : 20010223-024

· 수정완료일자 : 2001년 5월 15일

Eric Weibel은 금속 대 금속의 접합에서 발생하는 PIM의 현상을 분석하고 결합력에 관한 연구를 수행하였으며<sup>[4]</sup>, Wilcox는 동축선로에서의 PIM 발생 기구를 수치적으로 접근하였다<sup>[5]</sup>. 그러나 지금까지의 연구 결과는 대부분 PIM의 발생기구를 크게 접촉 비선형성과 물질 비선형성으로 분류하였으며, PIM의 제어기술 또한 접촉구조의 개선 혹은 도금기술에 집중되어 왔다.

본 논문에서는 기존에 연구 사례가 없는 필터설계 단계에서 PIM 문제를 회로적인 접근법을 통해 분석하고자 하며, 동축선로 구조에서의 PIM 해석기법을 필터 구조에 적용하여 필터의 PIM 특성을 분석하고자 한다.

## II. 공진기형 필터의 PIM 해석 모델

금속의 한정된 전도율로 인해 동축선로의 금속벽면에는 항상 RF 에너지의 손실이 존재하며, 이러한 RF 손실은 표피 깊이(Skin depth)로 규정된 체적 내에서 일어난다. 이러한 체적 내의 주기적 에너지 변화는 온도의 변화를 유발하게 되며, 금속의 전도율이 온도에 선형적으로 의존하므로 이러한 전도율은 PIM 주파수의 전류 원을 생성하는 고조파 성분을 함유하게 된다. 이는 온도 변화성분에  $\Omega$  ( $2f_1$ ,  $2f_2$ ,  $f_1 \pm f_2$ )의 주파수 성분이 포함되어 있으며, 이러한 온도변화와 선형적인 의존성을 갖는 금속의 전도율에  $\Omega$ 성분이 있음을 의미한다. 새로운 전류 원  $j_s = \alpha(E_{z,1} + E_{z,2})$ 으로 그 주파수 성분 중에는  $2f_1 - f_2$ 의 3차 PIM 신호가 발생되게 된다.  $E_{z,1}$ ,  $E_{z,2}$ 는 도체 내 전기장을 의미한다.

동축선로의 벽면에 발생된 PIM 전류는 다음과 같이 표현된다<sup>[5]</sup>.

$$j_s(b, r) = \Lambda_b(r) e^{-3r/\delta} \sin\left(\omega t - \frac{r}{\delta} + \frac{\pi}{4}\right) \quad (1)$$

여기서

$$\Lambda_b(r) = \frac{r\sigma_o^2}{8c_p} \cdot \frac{5\omega_1 - \omega_2}{\omega_1(\omega_2 - \omega_1)} \cdot E_{1,z}^2(b)E_{2,z}(b)e^{-3r/\delta} \cdot \sin\left(\omega t - \frac{r}{\delta} + \frac{\pi}{4}\right)$$

여기에서,  $\gamma$ 와  $c_p$ 는 각각 도체의 비저항 계수 및

비열이다. 이러한 PIM 전류는 동축선로 내에서 PIM 필드를 지원하며, 동축선로의 출력 PIM 전력은 다음과 같이 표현된다<sup>[5]</sup>.

$$P_{IM} = \frac{c}{4} \frac{b^2}{\sqrt{\epsilon}} \ln \frac{b}{a} H_{IM}^2(b) \\ = \left(\frac{69}{128\pi}\right)^{1/2} \frac{c\omega_2}{8\pi\sigma} \frac{\gamma^2}{c_p^2} \left(1 + \frac{b^3}{a^3}\right)^2 \cdot \frac{\sqrt{\epsilon}}{\left(\ln \frac{b}{a}\right)} \cdot \left(\frac{5\omega_1 - \omega_2}{\omega_2 - \omega_1}\right)^2 H_1^4(b)H_2^2(b)z^2 \quad (2)$$

식 (2)로 부터, PIM 전력은 두 입력신호의 전력, 주파수, 매질상수, 전송선로 구조(내경  $a$ , 외경  $b$ ) 등에 의존한다. 그림 1은 두 입력신호 전력을 각각 20 W,  $f_1 = 995$  MHz,  $f_2 = 1,005$  MHz로 가정하고, 동축선로의 외경을 30 mm로 선택했을 때의 내경에 따른 PIM의 수준을 계산한 결과이다.

그림 1로부터, 내경  $a$ 가 14 mm에서 15 mm( $Z_0 = 41.588 \sim 45.728 \Omega$ )로 선정될 때 최소의 PIM이 발생됨을 알 수 있다.

여러 개의 공진기로 구성된 필터의 PIM 문제를 해석하기 위해서는, 전송선로 공진기를 이해하여야 한다. 많은 마이크로웨이브 필터는 단락 혹은 개방형식으로 종단된 전송선로 공진기를 이용하고 있다. 그림 2는  $\lambda/4$  단락형식의 공진기와 동가 회로를 보여주고 있다.<sup>[6]</sup>

여기에서 전송선로 특성 어드미턴스  $Y_0$ 는 전송

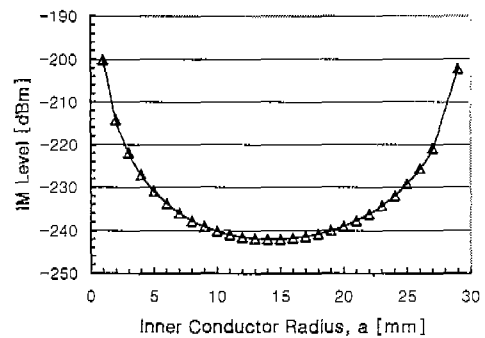
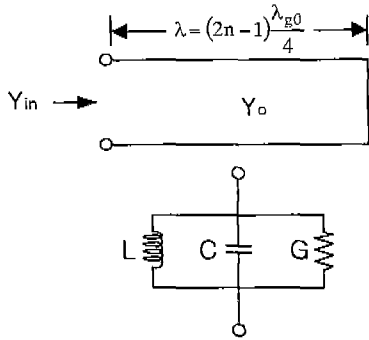


그림 1. 동축선로의 내경에 변화에 따른 PIM 특성  
Fig. 1. The PIM characteristic by variation of coaxial structure inner radius.



$$R = Y_0 a_r \lambda = \frac{(2n-1)}{4} Y_0 a_r \lambda_{g0}$$

$$\psi = \omega_0 C = \frac{1}{\omega_0 L} = \frac{(2n-1)}{4} \pi Y_0 \left( \frac{\lambda_{g0}}{\lambda_0} \right)^2$$

$$Y_{in} = G + j\psi \left( \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0 - \omega} \right)$$

$$Q = \frac{\psi}{G}$$

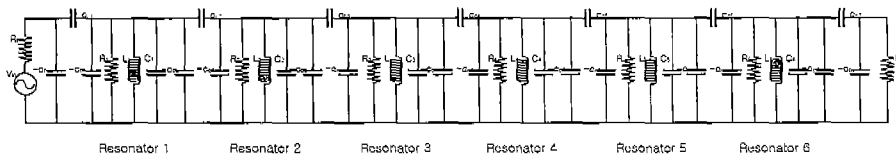
그림 2. 단락-회로 종단형태의 전송선로 공진기  
Fig. 2. Transmission line resonator with short-circuit termination.

구조에 의존하며, 전송구조가 동축선로 구조이면 특성 어드미턴스는  $\sqrt{C/L} = 2\pi/(\eta \ln b/a)$ 이 된다. 이러한 공진기들의 조합으로 필터를 설계할 수 있으며, 중심주파수, 대역폭, 리플, 차수, 임출력 임피던스를 각각 1 GHz, 10 MHz, 0.2 dB, 6차, 50 Ω으로 선정된 필터를 내외경이 각각 10 mm, 30 mm, 길이 75 mm로 유전체는 사용치 않은 동축 공진기로 구성할 때, 그 필터의 집중정수 등가회로는 그림

3과 같이 표시할 수 있다. 이때 각 공진기는 RLC 탱크회로로 표현되며, 공진기간의 결합은  $j$ 인버터로 표현된다. 각 공진기의 등가 인덕턴스  $L$ 값과 리지스턴스  $R$ 는 동축 공진기의 내외경 및 길이에 의해 결정된 값이며, 이는 필터의 설계에서 저역 통과 필터를 설계하고 Scaling-and-Conversion의 과정에 이용되며, 이러한 과정은 필터의 차수와 등가회로 정수 값의 관계를 설명하여 준다.

### III. 해석 및 최적화

필터를 구성하고 있는 각 공진기에 흐르는 전류를 그림 3의 모델을 이용하여 수치적으로 해석하였다. 그림 4는 각 공진기에 흐르는 전류의 최대값을 보여주고 있다. 각 공진기에 흐르는 전류는 중심주파수를 기준으로 상호 대칭적으로 나타나며, 이는 필터를 구성하는 공진기의 각 공진주파수를 대칭적으로 배치하였기 때문이다. 공진기 2와 3을 통해 흐르는 전류의 크기는 낮은 대역 가장자리와 높은 대역 가장자리에서 모두 다른 공진기에 비해 큰 전류가 흐르는 것을 확인할 수 있다. 이러한 공진기를 통해 흐르는 전류는 필터의 PIM 전력에 있어 각 공진기의 영향을 분석하는데 중요하다. 그 이유는 한정된 전도율을 갖는 구조물의 PIM 특성이 그 구조물을 흐르는 전류의 함수로 표현되기 때문이다. 따라서 공진기 2와 3이 필터의 PIM에 가장 큰 영향을 준다.



$C_1 = 1.89728 \text{ pF}$	$C_{C1} = C_{C7} = 211.15 \text{ fF}$
$C_1 = 1.89638 \text{ pF}$	$C_{C2} = C_{C6} = 13.928 \text{ fF}$
$C_1 = 1.89635 \text{ pF}$	$C_{C3} = C_{C5} = 10.853 \text{ fF}$
$C_1 = 1.89635 \text{ pF}$	$C_{C4} = 10.503 \text{ fF}$
$C_1 = 1.89638 \text{ pF}$	$L_1 = L_2 = L_3 = L_4 = L_5 = L_6 = 13.3575 \text{ nH}$
$C_1 = 1.89728 \text{ pF}$	$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R_6 = 662.569 \text{ k}\Omega$

그림 3. 6개 공진 필터의 집중정수 모델  
Fig. 3. Lumped-element model of six-resonator filter.

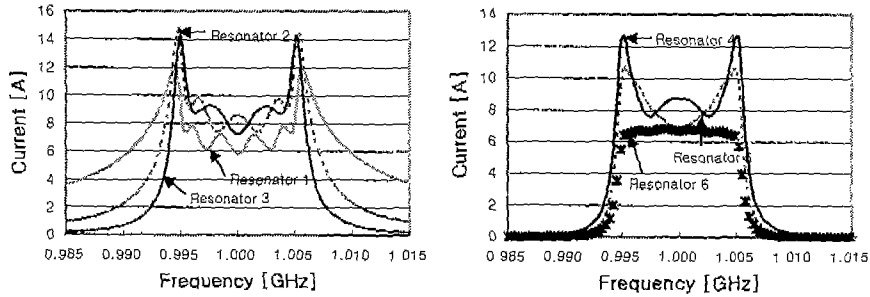


그림 4. 필터를 구성하는 각 공진기에 흐르는 전류  
 Fig. 4. The currents flowing through each resonator form filter.

식 (2)에서, PIM 수준이 동축선로를 흐르는 전류의 6승에 비례함을 알 수 있다. 이러한 개념을 필터를 형성하는 각 공진기에 흐르는 전류에 도입하면, 각 공진기에서 발생하는 PIM을 산출할 수 있다. 즉, 공진기로 이용되는 동축 공진기와 동일한 구조의 동축선로에 흐르는 전류와 PIM은 계산할 수 있으며, 동축 공진기에서의 전류도 계산이 가능하므로 최종 필터의 PIM 을 산출할 수 있다.

필터의 PIM 수준을 낮추기 위해서는, 필터를 구성하는 각 공진기에 흐르는 최대 전류의 양을 감소시켜야 한다. 공진기의 내경  $a$ 를 10 mm로 고정하고, 외경에 있어 각각 20, 30, 40 mm로 선정하여 필터를 구성하여, 시뮬레이션한 결과를 그림 5에 나타내었다.

외경의 증가는 주어진 전력에서 적은 전류의 양을 가져오므로 최종 PIM은 감소하였다. 공진기에서의 최대 전류는 외경이 20, 30, 40 mm에서 각각 17.36196 A, 14.69062 A과 13.38001 A로 계산되었다. 각 필터의 PIM은 외경이 20, 30, 40 mm에서 각각 -138.42 dBm, -152.63 dBm과 -159.67 dBm 전력 수준을 나타내었다. 외경이 2배의 증가하면 21 dB 정도의 PIM이 감소된다.

그림 6은 필터를 구성하는 공진기의 외경을 달리 했을 때 필터의 삽입손실을 시뮬레이션한 결과이며, Box내에 그림은 필터의 통과대역 영역을 확대한 그림이다. 외경이 가장 작은 20 mm인 경우 필터의 통과 대역내에서 삽입손실이 1 dB 가량으로 가장 크

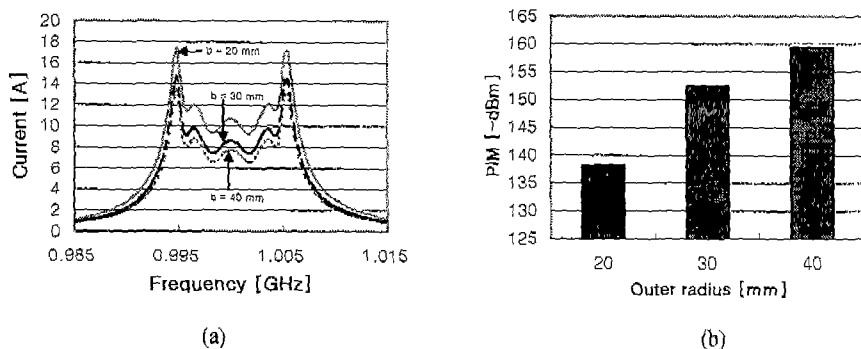


그림 5. (a) 필터에서 최대 전류를 갖는 공진기(2번째 공진기)에 흐르는 전류  
 (b) 세 종류의 필터 PIM 특성  
 Fig. 5. (a) The maximum currents flowing through resonators of 3-types resonators filters  
 (b) The PIM characteristics of 3-types resonators filters

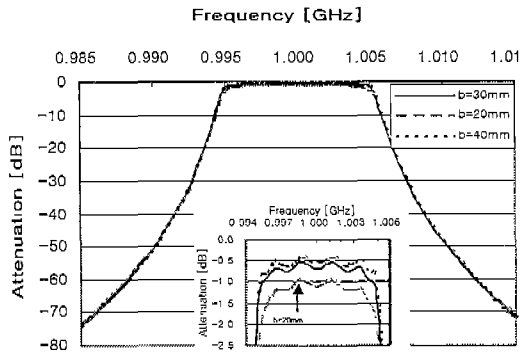


그림 6. 세 종류의 필터 삽입손실 특성  
Fig. 6. Insertion Loss characteristics of three different types filters.

게 나타남을 알 수 있다. 이것은 필터의 PIM 응답 특성과 삽입손실이 같은 경향을 갖고 있음을 보여주는 것이다.

소형화를 위해서는, 필터를 구성하는 공진기의 외경을 고정하고 내경을 변화시켜 PIM을 최적화하는 것이 바람직하다. 공진기의 외경을 30 mm로 고정할 때, 내경의 변화에 따른 필터의 PIM 특성을 그림 7에 나타내었다. 그림 7(a)는 각 동축선로의 전

류에서 같은 크기의 동축 공진기에 의한 전류의 증가에 대한 PIM의 증가량을 Delta IM으로 표현하였으며, 각 동축선로에 의한 PIM을 PIM\_0로 표현하였다. 그림 7(b)는 Delta IM과 PIM\_0에 조합으로 산출된 최종 필터의 PIM 응답 특성이다.

동축 공진구조에 의한 전류의 증가로 결정된 Delta IM은 각 공진기의 내경  $a$ 에 비례하며, 동축선로 구조에서의 초기 PIM\_0는 각 공진기의 내경  $a$ 에 반비례 관계가 있다. 필터의 PIM을 줄이기 위한 최적화된 내경은 8~10 mm로 나타났으며, 이 경우 전송선로 특성 임피던스는 65.92~79.30  $\Omega$ 이 된다.

필터를 구성하는 각 공진기의 외경  $b$ 가 20, 30, 40 mm일 경우, PIM 수준은 각각 -138.42 dBm, -152.63 dBm 과 -159.67 dBm을 나타내었다. 이것은 외경의 증가에 따라서 각 공진기에 흐르는 전류의 양이 감소하기 때문이다. 필터를 구성하는 각 공진기의 외경이 고정될 때, 내경의 변화에 따른 PIM의 수준을 해석하였다. 필터를 구성하는 각 공진기의 외경  $b$ 가 30 mm로 고정되었을 때, 각 공진기의 내경 변화에 PIM 수준은 어느 일정한 범위(8~10 mm)에서 최소의 수준을 나타내었다. 이 결과는 상용 이동통신에 이용되는 필터의 설계에 활용 가능하다.

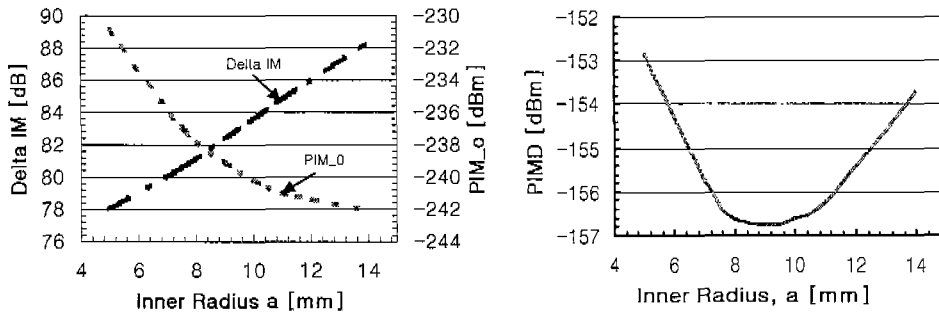


그림 7. (a) 동축선로 구조에서의 초기 PIM과 공진기에서의 전류증가에 의한 Delta IM  
(b) 공진기의 외경이 고정될 때 공진기 내경의 조정에 의한 PIM 전력  
Fig. 7. (a) The initial PIM in coaxial structure and Delta PIM by increased current in coaxial resonator  
(b) The PIM power by adjusting the inner radius of resonator in filter when outer radius is fixed( $b = 30$  mm).

### IV. 결 론

본 논문에서는 공진기형 필터에서 발생하는 PIM 전력을 해석하고 최적화하는 방법을 연구하였다. 필터를 구성하는 각 공진기에 흐르는 전류를 계산하여, 전류에 의한 각 공진기의 PIM을 계산하였다. 이러한 방법을 이용하여, 필터를 구성하는 각 공진기의 크기 변화를 통해 PIM 수준을 낮출 수 있다. 필터를 구성하는 각 공진기의 외경 증가는 각 공진기에 흐르는 전류를 감소시키며, PIM도 감소시키는 것을 알 수 있었다. 또한 필터를 구성하는 각 공진기의 외경을 고정할 경우, 내경의 변화에 따른 PIM의 영향을 해석하였다. 이러한 해석과정과 최적화 기법은 필터의 PIM을 최소화하는데 활용할 수 있다.

### 참 고 문 헌

[1] B. G. M. Helme, "Passive intermodulation of

ICT components", *The Institution of Electrical Engineers*, 1998.

[2] 조인귀, 이재화, 안승호, 최상국, 정명영, 최태구, "RF 커넥터의 Passive IMD에 관한 연구", 한국전자과학회지, 제 11권, 제 2호, pp.268-277.  
[3] C. E. Young, "Connector design techniques to avoid RFI", *NRL Memorandum Report* 4233.  
[4] E. Weibel, and U. Hugel, "Tests Evaluate the Influence of Junctions on PIM", *Microwave & RF*, pp. 70-80, Aug. 1998.  
[5] J. Z. Wilcox, and P. Molmud, "Thermal Heating Contribution to Intermodulation Fields in Coaxial Waveguides", *IEEE Transaction on Communications*, pp. 238-243, Feb. 1976.  
[6] G. L. Matthaei, L. Young, and E. M. Jones, *Microwave Filters, Impedance Matching Networks and Coupling Structures*. Dedham, Ma: Artech, 1980.

#### 조 인 귀



1997년 2월: 경북대학교 전자공학  
과(공학사)  
1999년 2월: 경북대학교 전자공학  
과(공학석사)  
1999년 5월~현재: 한국전자통신  
연구원 회로소자기술연구소 접  
속응용부품팀 연구원

[주 관심분야] RF 수동소자, Passive IMD

#### 정 명 영



1982년 2월: 부산대학교 기계공학  
과(공학사)  
1984년 2월: 부산대학교 기계공학  
과(공학석사)  
1998년 2월: 한국과학기술원 기계  
공학과(공학박사)  
1983년 9월~현재: 한국전자통신  
연구원 회로소자기술연구소 접속응용부품팀 팀장

[주 관심분야] Optical & RF Interconnection Passive IMD

#### 김 진 태



1996년 2월: 인천대학교 물리학과  
(이학사)  
1998년 8월: 고려대학교 물리학과  
(이학석사)  
2000년 2월: 고려대학교 물리학과  
시간강사  
2000년 10월~현재: 한국전자통신  
연구원 회로소자기술연구소 접속응용부품팀 연구원

[주 관심분야] 이동통신, Passive IMD

#### 최 태 구



1976년 2월: 고려대학교 물리학과  
(이학석사)  
1977년 1월: 고려대학교 물리학과  
강사  
1977년 12월: KIST 연구원  
1978년 1월~현재: 한국전자통신  
연구원 회로소자기술연구소 부품

기술개발부 부장

[주 관심분야] 이동통신, 마이크로파